



Vigilada Mineducación

METODOLOGÍA PARA LA MODERNIZACIÓN DE LOS SISTEMAS AUXILIARES
MECÁNICOS EN VÁLVULAS ESFÉRICAS DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS
CON TURBINAS TIPO PELTÓN

ALONSO GUTIÉRREZ BENÍTEZ

Tesis de grado

Asesor, docente:

PhD FRANCISCO JAVIER BOTERO HERRERA

UNIVERSIDAD EAFIT

Escuela de Ciencias aplicadas e Ingeniería

Maestría en ingeniería

Medellín

2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi familia, que con su apoyo y dirección me permitieron desarrollar un trabajo de calidad, haciéndome sentir orgulloso de la trayectoria que he tenido durante el ejercicio de la ingeniería mecánica. Igualmente, agradezco a mi asesor Francisco Botero, que, con su paciencia y conocimiento, se logró desarrollar esta tesis con grandes resultados. Tercero, y no menos importante, agradezco a Empresas Públicas de Medellín y ENEL Colombia por el suministro y autorización del uso de la información sobre las centrales hidroeléctricas descritas en este documento.

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	9
2	ABSTRACT	9
3	INTRODUCCIÓN	10
3.1	OBJETIVOS	10
3.1.1	Objetivo general	10
3.1.2	Objetivos específicos	11
4	MODERNIZACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	11
4.1	Centrales de generación hidroeléctrica en Colombia	11
4.2	Adecuaciones de centrales hidroeléctricas	12
4.3	Razones de peso para modernizar una central hidroeléctrica	14
5	VÁLVULA ESFÉRICA Y SISTEMAS AUXILIARES	16
5.1	UNIDADES DE MEDIDA	16
5.2	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS	16
5.2.1	Pilotaje del Sistema de mando de la válvula	17
5.2.2	Sistema By-pass	22
5.2.3	Sistema contrachorro	23
5.2.4	Sistema de mando	24
6	DIMENSIONAMIENTO DE LA CENTRAL	27
6.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES	28
6.1.1	Unidad hidráulica	28
6.1.2	Sistema By-Pass	32
6.1.3	Sistema contrachorro	34
6.1.4	Sistema servomotor	36
7	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	38
7.1	INTRODUCCIÓN	38
7.2	MANEJO DE LA INFORMACIÓN	38
7.3	ESTUDIOS PREVIOS	39
7.3.1	Levantamiento de información	40
7.3.2	Filosofía de funcionamiento	43
7.3.3	Listado de elementos a cambiar	45
7.3.4	Criterios de diseño	46

7.3.5	Consultas a fabricantes e Informe de alternativas	50
7.4	DESARROLLO TÉCNICO	51
7.4.1	Memoria de diseño	51
7.4.2	Simulación	106
7.4.3	Integración 3D	109
7.4.4	Elaboración de planos	110
7.4.5	Presupuestos	110
7.4.6	Especificaciones técnicas	111
8	CONCLUSIONES	116
9	BIBLIOGRAFÍA	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Años de operación, en Colombia, de centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton.	12
Figura 2. Proyección de proyectos hidroeléctricos en Colombia.	14
Figura 3. Esquema sistemas auxiliares de válvulas esféricas en central hidroeléctrica Guatapé.	17
Figura 4. Válvula esférica central hidroeléctrica El Guavio	18
Figura 5. Servomotor toroidal central hidroeléctrica El Guavio	19
Figura 6. Válvulas esféricas con contrapeso Vortex Hydra	20
Figura 7. Unidad hidráulica para el regulador lugar: Ontario.	21
Figura 8. Unidad hidráulica Central Hidroeléctrica Guatapé	22
Figura 9. Válvula esférica con Bypass Vortex Hydra Valves	23
Figura 10. Sistema contrachorro Central Hidroeléctrica Guatapé	24
Figura 11. Válvula esférica con accionamiento por servomotor Adams Switzerland	25
Figura 12. Sistema de mando en la Central Hidroeléctrica Guatapé.	26
Figura 13. Sistema de mando hidráulico.	27
Figura 14. Unidad hidráulica vinculada a unidad de generación de la Central Hidroeléctrica Guatapé	29
Figura 15. Válvula Chamber Central hidroeléctrica Guatapé	30
Figura 16. Unidad oleo-hidráulica dimensionada	32
Figura 17. Sistema By-pass dimensionado	33
Figura 18. Sistema By-Pass Dimensionado	33
Figura 19. Sistema de drenaje en la válvula esférica	34
Figura 20. Válvula de aguja sistema contrachorro dimensionado	35
Figura 21. Sistema contrachorro dimensionado	35
Figura 22. Sistema de mando Central Hidroeléctrica Guatapé	37
Figura 23. Servomotor dimensionado.	37
Figura 24. Estructura de la etapa de estudios previos	39
Figura 25. Estructura de carpetas – Etapa de estudios previos	40
Figura 26. Estructura de carpetas – levantamiento de información	41
Figura 27. Estructura dimensionamiento sistema de pilotaje	54
Figura 28. Esquema sistema de pilotaje para apertura y cierre de válvula esférica	55
Figura 29. Leyenda esquema de sistema de pilotaje	56
Figura 30. Válvula de bola multidireccional CBVSL-3 Stauff.	57
Figura 31. Dimensiones válvula multidireccional Stauff.	58
Figura 32. Torque requerido para accionamiento de válvula multidireccional Stauff.	58
Figura 33. Estructura dimensionamiento Sistema By-Pass	67
Figura 34. Válvula de aguja Sistema By-Pass	71
Figura 35. Válvulas presentes en sistema By-Pass	73
Figura 36. Válvulas de guarda Sistema de drenajes existente	76
Figura 37. Estructura dimensionamiento Sistema contrachorro	78
Figura 38. Válvula de aguja Sistema contrachorro.	81
Figura 39. Sistema contrachorro – Trazado de tubería actual hacia recinto de turbina.	85
Figura 40. Estructura para dimensionamiento de sistema de mando.	87

Figura 41. Esquema servomotor – Sistema de mando	88
Figura 42. Curva de fatiga aplicable al material seleccionado.	90
Figura 43. Diagrama de cuerpo libre Caso a tracción – Vástago servomotor	94
Figura 44. Diagrama de cuerpo libre – Caso a compresión – Vástago servomotor	97
Figura 45. Diagrama de cuerpo libre pasador – Servomotor	98
Figura 46. Diagrama de fuerzas presentes en el pasador – Servomotor.	99
Figura 47. Disposición de bridas SAE y adaptador para conexión NPT	104
Figura 48. Vistas e isométrico Brida SAE soldada ISO 6162-1	105
Figura 49. Vistas e isométrico brida SAE roscada NPT ISO 6162-1	105
Figura 50. Vistas e isométrico Adaptador roscado NPT	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características unidad hidráulica para pilotaje de sistema de mando	31
Tabla 2. Características del servomotor de accionamiento	36
Tabla 3. Tabla para levantamiento de información para visita de campo	43
Tabla 4. Tabla de listado de elementos a cambiar	46
Tabla 5. Resumen información de los proveedores	50
Tabla 6. Condiciones de operación válvula esférica – Dimensionamiento sistema de pilotaje	59
Tabla 7. Selección válvula multidireccional – Sistema de accionamiento	59
Tabla 8. Dimensionamiento de cilindro hidráulico para pilotaje	60
Tabla 9. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema de pilotaje	62
Tabla 10. Validación volumen de tanque sumidero – DIN 19704	63
Tabla 11. Variables para potencia requerida de la bomba.	64
Tabla 12. Resultados sistema de pilotaje optimizado	65
Tabla 13. Comparativa resultados Sistema de pilotaje – Sistema unidad hidráulica actual	66
Tabla 14. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema By-Pass	68
Tabla 15. Dimensiones del actuador – Válvula de aguja Sistema By-Pass	72
Tabla 16. Características tubería sistema By-Pass modernizado	73
Tabla 17. Válvula de aguja – Sistema By-Pass Modernizado	74
Tabla 18. Válvulas de guarda (Mantenimiento) – Sistema By-Pass Modernizado	74
Tabla 19. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema de drenaje	75
Tabla 20. Válvula de guarda (Mantenimiento) – Sistema de drenajes modernizado	76
Tabla 21. Comparación de materiales para vástago de válvula de aguja – Sistema contrachorro	79
Tabla 22. Comparación de materiales para punta del vástago válvula de aguja – Sistema contrachorro.	79
Tabla 23. Comparación materiales carcasa válvulas de aguja – Sistema contrachorro.	79
Tabla 24. Dimensiones actuador válvula de aguja – Sistema contrachorro	82
Tabla 25. Válvulas de guarda – Sistema contrachorro modernizado	82
Tabla 26. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema contrachorro	83
Tabla 27. Características de la tubería – Sistema contrachorro modernizado	85
Tabla 28. Dimensiones servomotor – Sistema de mando	88
Tabla 29. Propiedades mecánicas del material ASTM A516 Gr 70.	90
Tabla 30. Variables Método de Fatiga C – API 579 - 1	92
Tabla 31. Áreas del vástago y pistón – Servomotor de accionamiento	93
Tabla 32. Propiedades Acero AISI 420 – BS EN 10088-5	94
Tabla 33. Datos y resultados – Caso a tracción – Vástago servomotor	95
Tabla 34. Propiedades del Material AISI 420 – Análisis de fatiga DIN 19704	96
Tabla 35. Datos y resultados – Caso a compresión – Vástago servomotor	98
Tabla 36. Propiedades Acero inoxidable 316L – Tubería Sistema de mando	100
Tabla 37. Valores de variables requeridas en ASME B31.1 – Tuberías sistema de mando	100
Tabla 38. Espesores mínimos – Tubería sistema de mando	102

Tabla 39. Características válvulas para sistema de mando	103
Tabla 40. Características filtros para el sistema de mando	106
Tabla 41. Formato de tabla de presupuestos	111
Tabla 42. Formato condiciones ambientales central hidroeléctrica	112
Tabla 43. Características técnicas garantizadas.	116

1 RESUMEN

Actualmente en Colombia se aumenta la demanda de energía eléctrica y la red de generación con la que cuenta el país tiene varios años de operación, considerando que la mayoría de las centrales hidroeléctricas fueron construidas entre 1960 y 1980. De acuerdo con lo anterior, es de suma importancia contar con una metodología aplicable, a más de la mitad de las centrales hidroeléctricas presentes en Colombia las cuales generan energía por medio de turbinas tipo Pelton, para modernizar los equipos mecánicos y alargar la vida útil de la central con el fin de garantizar una generación de energía más eficiente y sin paradas de emergencia por fallos en los equipos.

En este documento se presenta una descripción de los sistemas y equipos instalados en las válvulas esféricas de centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton, su funcionamiento y una metodología detallada que entrega como resultado una estructura documental para su proceso de licitación.

Palabras claves: Modernización, Generación de energía, Centrales hidroeléctricas, Turbinas tipo Pelton, Válvulas esféricas, Sistema de mando, Sistema By-Pass, Sistema contrachorro, Sistema servomotor.

2 ABSTRACT

Currently in Colombia the demand for electricity is increasing and the generation network that the country has several years of operation, considering that most of the hydroelectric plants were built between 1960 and 1980. According to the above, it is extremely important to have a methodology applicable to more than half of the hydroelectric powerplants present in Colombia, which generate energy through Pelton-type turbines, to modernize the mechanical equipment and extend the useful life of the plant to guarantee a more efficient energy generation and without emergency stops due to equipment failures.

This document presents a description of the systems and equipment installed in the spherical valves of hydroelectric plants with Pelton-type turbines, their operation and a detailed methodology that results in a documentary structure for the bidding process.

Key words: Modernization, Energy generation, Hydroelectric powerplants, Pelton-type turbines, Spherical valves, Drive system, By-Pass System, Jet brake system, Servomotor system.

3 INTRODUCCIÓN

Mantener un buen nivel de generación energética debe ser un propósito firme en cualquier sociedad para evitar desabastecimientos energéticos que impacten en forma significativa, no sólo la economía, sino también las condiciones de vida de las personas. Para ello, cada vez se presentan más proyectos para la ampliación de la capacidad energética del país. No obstante, las centrales hidroeléctricas que operan actualmente no deben quedarse atrás, por lo que es indispensable que estas cuenten con una generación de energía optima e incluso con la implementación de tecnologías que, en su época de construcción, no se presentaban.

Más de la mitad de la generación energética del país proviene de recursos hídricos y de esta, la mayoría cuentan con turbinas tipo Pelton. Considerando que la mayoría de las centrales cuenta con mínimo 30 años de operación, es pertinente planear procedimientos de modernización que permitan ampliar la vida útil de los equipos. Es por lo anterior, que es de suma importancia contar con una metodología que abarque actividades para el dimensionamiento, caracterización y selección de equipos aplicables a los sistemas mecánicos presentes en las centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton.

Dado que, en las centrales hidroeléctricas se encuentran varios sistemas mecánicos, la válvula esférica es considerada como elemento crítico ya que, principalmente, es la encargada de proteger la turbina y, además, un daño o actividades preventivas o correctivas de mantenimiento, requieren realizar una parada completa de la central y como consecuencia, periodos largos sin generación conllevan a pérdidas de dinero no percibido por generación.

Por lo anterior, en este manuscrito se propone una metodología para modernizar los sistemas auxiliares presentes en las válvulas esféricas en centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton que actualmente se encuentran en operación en el país.

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo general

El objetivo general es desarrollar una metodología de caracterización de los equipos que conforman los sistemas auxiliares mecánicos de una central hidroeléctrica con turbinas tipo Pelton para ejecutar un proyecto de modernización.

El resultado esperado al aplicar la metodología es una estructura documental que soporte toda la ingeniería para una licitación. Esta estructura incluye la definición de los requisitos técnicos que se deben garantizar para el correcta instalación y funcionamiento de los sistemas. Para mayor claridad, se tratará el caso de la modernización de los sistemas presentes en la válvula de admisión de una central hidroeléctrica con turbinas tipo Pelton, como lo es la central hidroeléctrica Guatapé, estos son: el sistema de pilotaje para el mando, el sistema By-Pass, sistema contrachorro y sistema de mando de la válvula.

3.1.2 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general descrito en el numeral 3.1.1, se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Argumentar la importancia de la modernización de centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton para la generación de energía, considerando los grandes proyectos de Colombia que se encuentran actualmente operando, adecuaciones aplicables para el aumento de vida útil y criterios integrales para la ejecución de estas actividades.
2. Describir sistémicamente los elementos mecánicos que interactúan con las válvulas esféricas en una central hidroeléctrica.
3. Formular un caso de estudio utilizando como referencia datos reales de la central hidroeléctrica Guatapé para desarrollar e implementar la metodología de modernización de sistemas auxiliares presentes en válvulas esféricas.
4. Definir la estrategia y el protocolo para la modernización de los sistemas mecánicos presentes en válvulas esféricas, que dan como resultado la estructura documental de ingeniería de soporte para realizar un proceso de licitación definiendo las condiciones requeridas de diseño de cada uno de los componentes.

4 MODERNIZACIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

4.1 CENTRALES DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN COLOMBIA

Dando cumplimiento al objetivo específico 1 del numeral 3.1.2, según el Plan de Expansión de Referencia Generación-Transmisión, realizado por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética, 2020), la generación de energía eléctrica en Colombia en 2019 es equivalente a 17.660 MW, donde el 63% proviene de recursos hídricos con centrales hidroeléctricas de diferentes capacidades y características entre las cuales se encuentran las centrales hidroeléctricas de Playas, Guatapé, Tasajera, Troneras, Guadalupe III, Guadalupe IV, entre otras.

En la Figura 1 se muestran los años de operación de algunas de las centrales que operan actualmente en Colombia y cuentan con turbinas tipo Pelton.

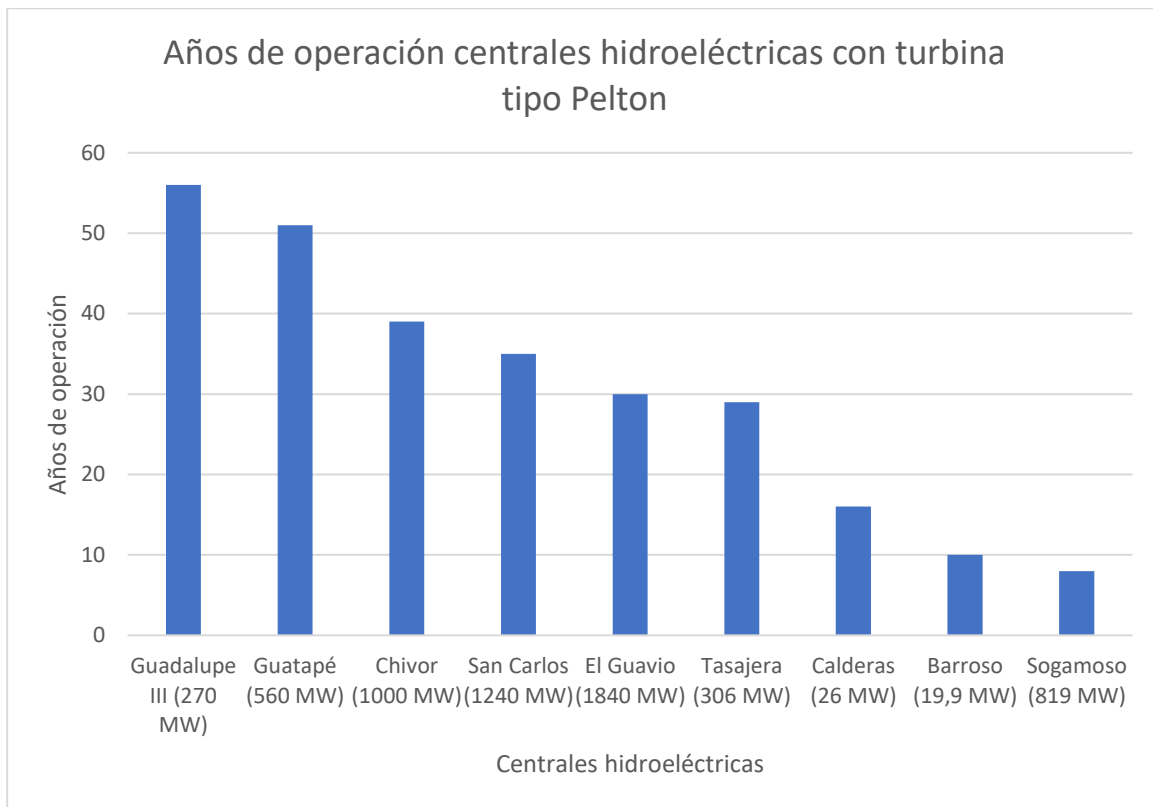


Figura 1. Años de operación, en Colombia, de centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton.

Estudio Propio. Datos tomados de (AES CHIVOR, 2011), (Celsia, 2022), (Empresas Públicas de Medellín, 2022), (Wikipedia, 2022)

Como se observa, varias de las centrales hidroeléctricas mencionadas, se construyeron durante el gran apogeo de construcción de centrales hidroeléctricas en Colombia, entre los años 1960 a 1985, las cuales aún están operando, y se espera que puedan operar otros 30, 40 o 50 años más; indicando que los sistemas de dichas centrales llevan en operación un mínimo de 37 años.

Las centrales hidroeléctricas construidas en el periodo presentado ya han cumplido, o están muy cerca de cumplir, su vida útil estimada de 25 a 40 años, el cual depende de las condiciones de operación y mantenimiento. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los sistemas pueden presentar fallas que deriven en el paro total de las centrales o en actividades de mantenimiento correctivo de gran costo y por esta razón, los sistemas ya sean principales o auxiliares, deben evaluarse para ser rehabilitados, repotenciados o modernizados, basados en su necesidad.

4.2 ADECUACIONES DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

En las centrales hidroeléctricas se pueden presentar tres tipos de adecuaciones: rehabilitación, repotenciación y modernización, sin embargo, ¿cuál es la diferencia entre éstas?

Según el Banco Interamericano de Desarrollo – BID (Alarcón, 2017):

*“La **rehabilitación** de una central hidroeléctrica consiste en realizar inversiones para retornarla a sus condiciones iniciales de funcionamiento. Se implementa cuando, debido al deterioro de los equipos, los costos de operación y mantenimiento o los tiempos de parada se han incrementado sustancialmente, y se ha reducido la capacidad disponible y/o la energía generada. La rehabilitación puede incrementar en algunos puntos porcentuales la eficiencia o potencia de generación de una central (al utilizar diseños computarizados, y equipos electromecánicos y sistemas de control más modernos a los inicialmente instalados). No obstante, el principal y mayor beneficio de la rehabilitación es extender la vida útil de las centrales por varias décadas adicionales, aprovechando las obras civiles existentes con equipos electromecánicos nuevos, o rehabilitados.*

Dados los actuales desafíos para la construcción de nuevos grandes embalses en nuestra región, es esencial evaluar la rehabilitación en las centrales con presa y embalse. Estos embalses, además de proveer generación de respaldo para fuentes renovables intermitentes (eólica y solar), permiten el almacenamiento estacional de agua y energía, para las épocas secas, ayudando a mitigar impactos del cambio climático. En estos casos, es clave incluir en el estudio de rehabilitación el análisis estructural de las presas y obras civiles complementarias, a fin de confirmar su estado, las necesidades de inversiones, y disminuir el riesgo de desastres. De la misma manera, es necesario realizar un análisis de la sedimentación del embalse, que en algunos casos pudo reducir la vida útil de la central.

***La repotenciación (o “repotenciamiento”, en algunos países),** por otro lado, implica un rediseño del aprovechamiento hidroeléctrico para incrementar la potencia de la central, ya sea por una actualización en las condiciones hidrológicas (por ejemplo, nuevos aportes de caudal, información actualizada de la hidrología, o cambios de las condiciones de la cuenca debidas al uso humano del agua, o el cambio climático), o por modificaciones regulatorias (por ejemplo, implementación de precios de punta en los sistemas eléctricos, incremento de energía intermitente en los sistemas, etc). La repotenciación apunta a optimizar el uso de las obras civiles ya existentes, bajo nuevas condiciones, con la instalación de equipos de generación adicionales, o la sustitución de equipos viejos por unos de mayor potencia. Al igual que la rehabilitación, al tener los costos de las obras civiles hundidos, estas inversiones tienen alta rentabilidad; asimismo, deben incorporar un análisis de las obras civiles existentes, y los riesgos de cambio climático. La repotenciación, no obstante, puede implementarse en cualquier momento de la vida de una central (no necesariamente al final de la vida útil de los equipos), cuando las condiciones hidrológicas, financieras, de uso de agua, o de la energía así lo requieran.”*

***La modernización,** finalmente, apunta al cambio de los equipos de control de la central, sin modificar el esquema físico de aprovechamiento, ni incrementar potencia adicional. Estas inversiones normalmente son menores, ya que no implican un cambio de la turbina o generador, o modificaciones en obras civiles, pero permiten un mejor aprovechamiento hidroeléctrico, mejoran la seguridad, reducen los tiempos de parada y los costos de operaciones y mantenimiento. Este tipo de inversiones incluyen normalmente el reemplazo de sistemas de control antiguos (mecánicos, o electromecánicos), por sistemas de control electrónicos y tele-controlados. Dado el creciente énfasis en el desarrollo de energías renovables no convencionales, la modernización de centrales puede ser atractiva cuando*

se planea modificar la función de la central, por ejemplo, para pasar de ser generación de base, a operar como respaldo de fuentes intermitentes.

Colombia es un país que cuenta con un gran potencial de generación de energía eléctrica. En el 2022, se han registrado, para entrar en operación en los próximos años, un total de 21 proyectos hidroeléctricos, con el fin de suplementar la red de generación energética.

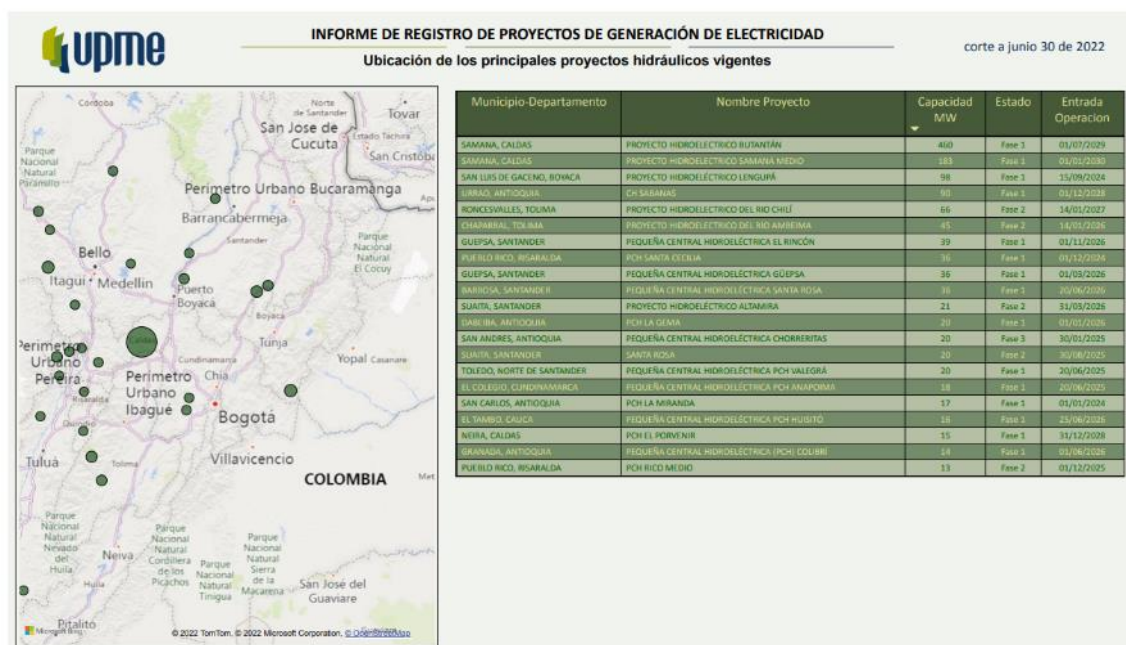


Figura 2. Proyección de proyectos hidroeléctricos en Colombia.

Tomado de “Informe de registro de proyectos de generación de Electricidad”.
Elaborado por la UPME. (UPME, 2022)

4.3 RAZONES DE PESO PARA MODERNIZAR UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Actualmente en Colombia, las regulaciones ambientales existentes para los proyectos hidroeléctricos son cada vez más estrictas y el costo para el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico nuevo es cada vez mayor, por lo que tener la alternativa de modernizar las centrales que actualmente operan en el país es una opción viable. Estos procedimientos permiten mantener en condiciones óptimas las centrales, reducir los costos de mantenimiento de los equipos y los costos de operación de la central.

Si se tiene en cuenta que cada equipo de una central hidroeléctrica cuenta con un ciclo de vida inherente que depende de su diseño, calidad, factores de seguridad, condiciones de operación, tipo de material, resistencia corrosiva, entre otros este ciclo, se puede ver afectado dependiendo de factores de mantenimiento que se le realicen al equipo o si este se encuentra trabajando en condiciones para las que no fue diseñado.

Cuando alguno de los sistemas, incluidos en el alcance de este documento descrito en el numeral 3.1, salen de operación de una central, se presentan grandes consecuencias en

su generación y puede afectar su eficiencia por lo que es ideal contar con sistemas confiables y precisos.

La norma IEC BS EN 62256:2017 (British Standards Institution, 2017), determina que el ciclo de vida esperado de los equipos mecánicos pesados y auxiliares donde se incluyen válvulas mariposa, válvulas esféricas, compuertas planas y radiales, puente grúas y equipos auxiliares mecánicos es de 25 a 40 años de operación. El rango se debe a diferentes variables mencionadas anteriormente como la calidad del material, condiciones de operación, consideraciones de seguridad en el diseño y mejoramientos en su rendimiento. Estos sistemas con tantos años de operación pueden requerir tiempos más prolongados de mantenimiento, lo que tendría como consecuencia la no generación y, por lo tanto, el no recibir ingresos por ésta.

Para tener una referencia de los ingresos que no recibiría una empresa generadora de energía por la parada de una unidad durante una hora, se realizó un análisis tomando como ejemplo la central hidroeléctrica Guatapé, propiedad de Empresas Públicas de Medellín (EPM), la cual cuenta con una capacidad de generar 560 MW, con ocho unidades de características similares. Para determinar estos ingresos se utilizó la tarifa dada la empresa XM, especializada en la administración del mercado de energía mayorista, la cual es de 266,25 \$/kWh para contratos no regulados hasta el 19 de septiembre de 2022. De acuerdo con lo anterior, si la central, por cualquier motivo, una unidad es dejada fuera de servicio, los ingresos que EPM Generación Energía deja de percibir en una sola hora serían de aproximadamente de \$18.673.500/hora; razón por la cual, una parada prolongada significa grandes cantidades de dinero dejados de percibir.

Las paradas de mantenimiento pueden tomar incluso un mayor tiempo cuando no se cuenta con los repuestos requeridos para los sistemas instalados y/o los fabricantes de estos ya discontinuaron dichas referencias.

El 83% de los equipos de generación de energía eléctrica en Colombia son fabricados por la firma Andritz, una empresa mundialmente reconocida por su experiencia en la fabricación de equipos principales y sistemas auxiliares para centrales hidroeléctricas. Entre estos se encuentran repuestos para un 46% tipo Francis y un 54% tipo Pelton. Esta empresa justifica la modernización de las centrales hidroeléctricas, con base en la reducción de pérdidas de producción de energía modernizando los sistemas por la discontinuidad de los repuestos y por ser una oportunidad de implementar mejores sistemas que permitan una asistencia remota en la operación. (Sierra & Sgro, 2022)

En consecuencia, la disponibilidad de generación de energía de las centrales se puede ver afectada por las condiciones de los sistemas auxiliares. Los apagones forzados pueden ser generados por estos sistemas y su solución se puede encontrar mediante la reparación, reemplazo o mejora de estos, lo cual sería una opción muy conveniente en cuanto a costo-eficiencia (Electric Power Research Institute, 1999).

Dado lo anterior, a lo largo de este documento, se trabajará una metodología para modernizar los sistemas auxiliares mecánicos de la válvula de admisión de una central hidroeléctrica (ver numeral 3.1). Esta metodología es aplicable a otros sistemas auxiliares presentes en una central hidroeléctrica.

5 VÁLVULA ESFÉRICA Y SISTEMAS AUXILIARES

En esta sección se desarrolla el objetivo específico 2 del numeral 3.1.2.

La válvula esférica es el equipo designado para la protección de los equipos principales de la central, siendo específicamente, rodete, inyector, eje y, por ende, el generador. Adicionalmente, las válvulas esféricas son utilizadas para evitar el ingreso de agua a la turbina con el fin de poder realizar actividades de mantenimiento preventivo o correctivo e incluso por alguna emergencia que se presente. Para su operación cada una cuenta con los siguientes sistemas, los cuales serán descritos en el numeral 5.2:

- Pilotaje del sistema de mando de la válvula.
- Sistema by-pass y drenaje.
- Sistema contrachorro.
- Sistema de mando.

5.1 UNIDADES DE MEDIDA

Todas las unidades serán expresadas en el Sistema Internacional de Unidades (SI), excepto los diámetros de las tuberías que serán denominados en NPS (Pulgadas) o DN (milímetros), según el caso.

5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

A continuación, se realizará una descripción general de cada uno de los sistemas presentes en el alcance descrito en el numeral 3.1 de este informe. De la misma forma, se describirá un dimensionamiento de cada uno de ellos, útil para el proceso de modernización a implementar.

En la Figura 3, se muestra el esquema de los cuatro sistemas presentes en las válvulas esféricas y sus conexiones entre ellos.

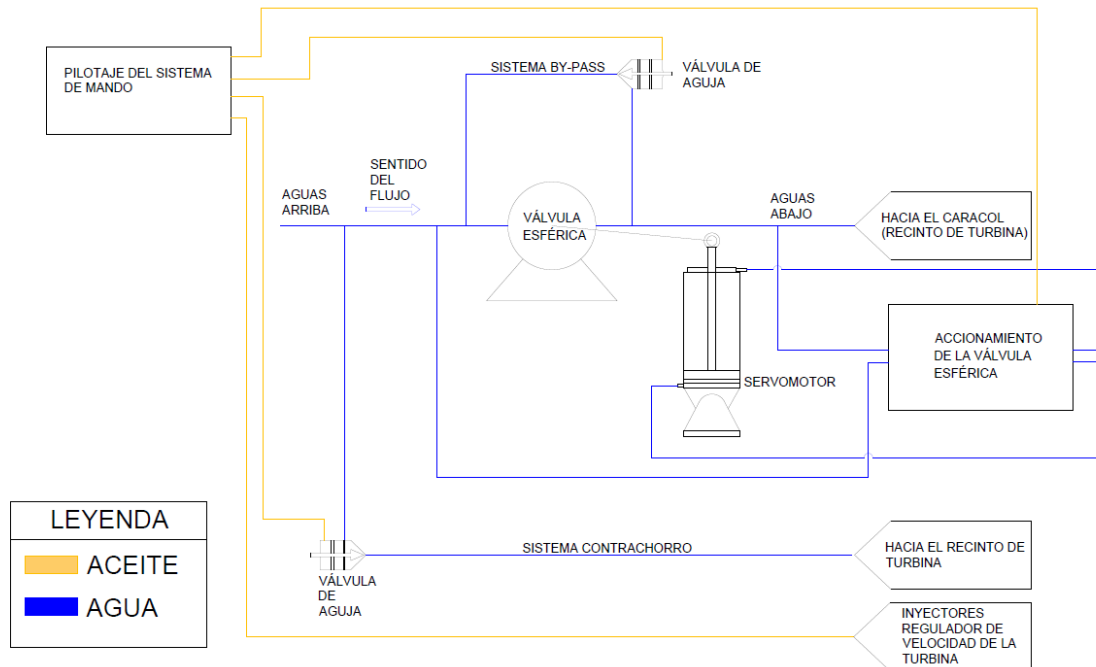


Figura 3. Esquema sistemas auxiliares de válvulas esféricas en central hidroeléctrica Guatapé.

5.2.1 Pilotaje del Sistema de mando de la válvula

La válvula de admisión es uno de los elementos más importantes para la protección de las turbinas de una central hidroeléctrica. Este equipo permite restringir el paso de agua proveniente de la toma de la presa hacia la turbina, ya sea para un mantenimiento o atender una emergencia que se presente en la unidad y deba ser parada. La válvula de admisión se debe diseñar para soportar la presión ejercida por el agua, contar con sistemas que permitan un correcto funcionamiento de la turbina para evitar daños en ella y permitir su cierre lo más rápido posible de forma segura cuando se detecte alguna anomalía en el distribuidor o en la turbina.

Para ello, la válvula cuenta con un sistema de mando el cual se distribuye en dos subsistemas: el primero es el *pilotaje*, el cual es el que comanda u ordena la apertura o cierre de la válvula y el segundo es el *accionamiento*, sistema encargado del movimiento del actuador para generar la operación de la válvula.

5.2.1.1 Pilotaje para el mando de la válvula

El pilotaje incorporado en el sistema de mando de la válvula, como se mencionó anteriormente, es el encargado de dar la orden para que el sistema de accionamiento permita el movimiento de la parte rotor-obturador de la válvula. Este sistema de pilotaje tiene dos variantes, una actuada por agua y otra por aceite.

Los sistemas de pilotaje actuados por medio de agua son constituidos en conjunto con el lote de trabajo de servomotor, ya que estos dos obtienen el fluido de operación por medio de dos tomas ubicadas aguas arriba y aguas abajo de la válvula en la conducción de la central hidroeléctrica. Este tipo de sistema de pilotaje se compone de los siguientes elementos:

- Equipos de filtrado que garanticen una buena calidad del agua y protección de los demás elementos posteriores de problemas de erosión y obstrucción por sedimentos presentes en el agua.
- Válvulas que permitan el cierre del sistema para un mantenimiento.
- Válvulas direccionales con función de intercambiar los dos casos requeridos en este sistema: apertura y cierre de la válvula de admisión.

Un ejemplo de un sistema con este tipo de sistema se presenta en la central hidroeléctrica El Guavio propiedad de la empresa ENEL, ubicada en el municipio de Ubalá en Cundinamarca. Esta central es la más grande de Colombia hasta la fecha con una capacidad instalada de 1.260 MW por medio de cinco turbinas. El sistema de mando de la válvula utiliza agua de la conducción para el movimiento de su servomotor toroidal, actuador que rara vez se ve, actualmente, en una central hidroeléctrica.

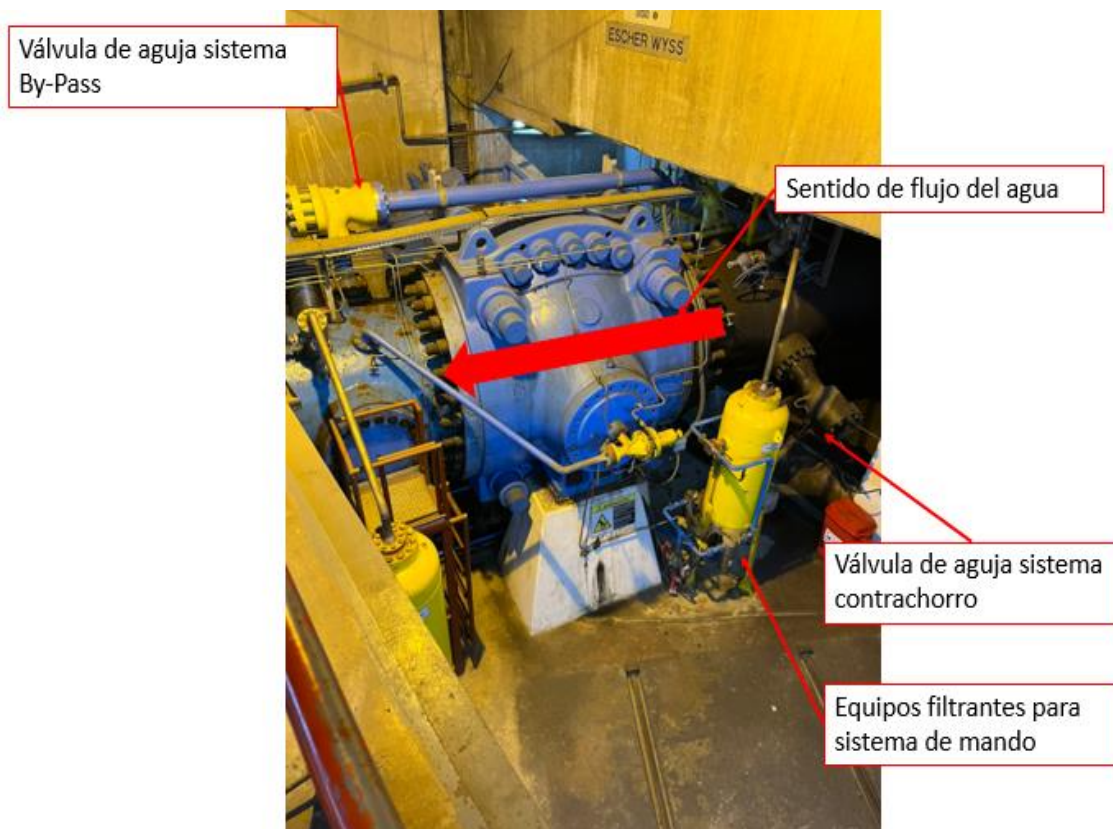


Figura 4. Válvula esférica central hidroeléctrica El Guavio
Foto suministrada por ENEL Colombia.

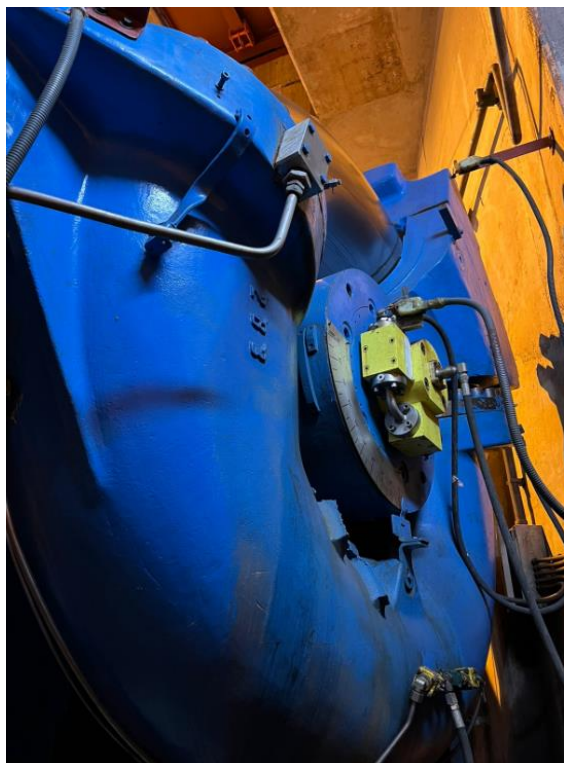


Figura 5. Servomotor toroidal central hidroeléctrica El Guavio
Foto suministrada por ENEL Colombia.

Como principal factor a considerar en este sistema, y en general todos aquellos que realicen su funcionamiento mediante el agua que se obtiene de la presa de la central, es asegurarse de contar con un fluido en buenas condiciones. Esto hace referencia a los sedimentos presentes en el agua, los cuales pueden afectar el estado y el funcionamiento de los equipos del sistema, razón por la cual se instalan filtros en pilotajes con agua que garanticen un fluido limpio y aumentar el ciclo de vida de los equipos que se encuentren posteriores a ellos. Con este inconveniente presente en diferentes centrales en el país, los sistemas pilotados con aceite son una opción para tener en cuenta en la solución ya que se aísla la mitad del sistema utilizando un fluido en muy buenas condiciones que no afecte posteriormente los equipos.

Los sistemas de pilotaje operados por aceite requieren de un sistema hidráulico compuesto principalmente por una unidad que permita el suministro del fluido para su funcionamiento. Estos sistemas están compuestos por los siguientes elementos:

- Unidad hidráulica que suministre el aceite para su operación con sus elementos de almacenamiento y filtración del aceite.
- Válvulas que permitan el cierre del sistema para un mantenimiento.
- Válvulas direccionales con función de intercambiar los dos casos requeridos en este sistema: apertura y cierre de la válvula de admisión.
- Actuadores que realicen la función de comando del sistema de accionamiento. Estos actuadores difieren del sistema servomotor ya que estos permitirán el paso del fluido correspondiente a dicho sistema que se explicará posteriormente.

Este caso se presenta en la central hidroeléctrica Guatapé y el cual será explicado con detalle en el dimensionamiento del sistema.

La selección de cualquiera de las configuraciones de este sistema está sujeta a los requisitos de operación de la central y los criterios del operador.



Figura 6. Válvulas esféricas con contrapeso Vortex Hydra
Referencia: (Vortex Hydra Innovation & Engineering, 2022)

Las unidades hidráulicas utilizadas en estos sistemas de accionamiento cuentan con los siguientes elementos básicos:

- *Tanque sumidero*: encargado de almacenar el aceite requerido para la operación de la unidad. Este cuenta con elementos de monitoreo de nivel y de temperatura como también, filtros de aire que evitan la contaminación del fluido dentro del tanque.



Figura 7. Unidad hidráulica para el regulador lugar: Ontario.

Tomado de (Magnéto Hydraulique et pneumatique Inc., 2018)

- *Sistema de bombeo de aceite:* compuesto principalmente por bombas de aceite, motores, válvulas y filtros. Las bombas de aceite pueden ser de desplazamiento positivo, ya sea de engranajes, tornillo, lóbulos o pistón. En las varias opciones de configuración que se tienen en las unidades hidráulicas, generalmente las bombas se encuentran dentro del tanque sumidero. En ocasiones se encuentran por fuera para facilitar las acciones de mantenimiento.

Los motores que operan las bombas son del tipo inducción, de jaula de ardilla por su tamaño, y se encuentran conectados directamente a las bombas.

- *Válvulas direccionales:* Controlan el paso y la dirección de aceite en el sistema. Por medio de accionamientos mecánicos o eléctricos se cambia la posición de la válvula para dar paso al aceite.
- *Actuador:* los sistemas pueden contar con servomotores de simple o doble efecto, motores hidráulicos, válvulas accionadas por aceite y demás elementos que contribuyan a la función del sistema.
- *Accesorios:* Las unidades hidráulicas pueden contar con accesorios como filtros de aceite que garanticen un fluido limpio y evitar obstrucción en las tuberías o equipos, filtros de aire en el tanque sumidero que permitan el ingreso de aire al elemento de almacenamiento sin impurezas que contaminen el fluido, mangueras de conexión, racores para facilidad de conexión y demás elementos que permitan y mejoren el funcionamiento de la unidad y su eficiencia.
- *Elementos de control o monitoreo:* tomas de presión para monitoreo manual, manómetros, termómetros, sensores de nivel y demás elementos indicadores que suministran información en tiempo real sobre el estado de la condición y funcionamiento del sistema.

Es más común encontrarse sistemas de mando pilotados por aceite, debido a que estos pueden incluso, ser controlados por una unidad hidráulica en común incluyendo otros

sistemas como el sistema regulador de velocidad de la turbina, el sistema by-pass y el sistema contrachorro, que se explicarán en el numeral 6.1.1. Asimismo, la calidad y condición de estado del fluido es un aspecto para tener en cuenta ya que determina la frecuencia de mantenimiento del sistema. Los sistemas de pilotaje que toman el agua de la conducción deben contar con una etapa previa de filtrado que garantice la remoción de los sedimentos provenientes del embalse; esto implica además considerar las tareas de mantenimientos asociadas para prevenir taponamientos y evitar paros previsibles de las máquinas.

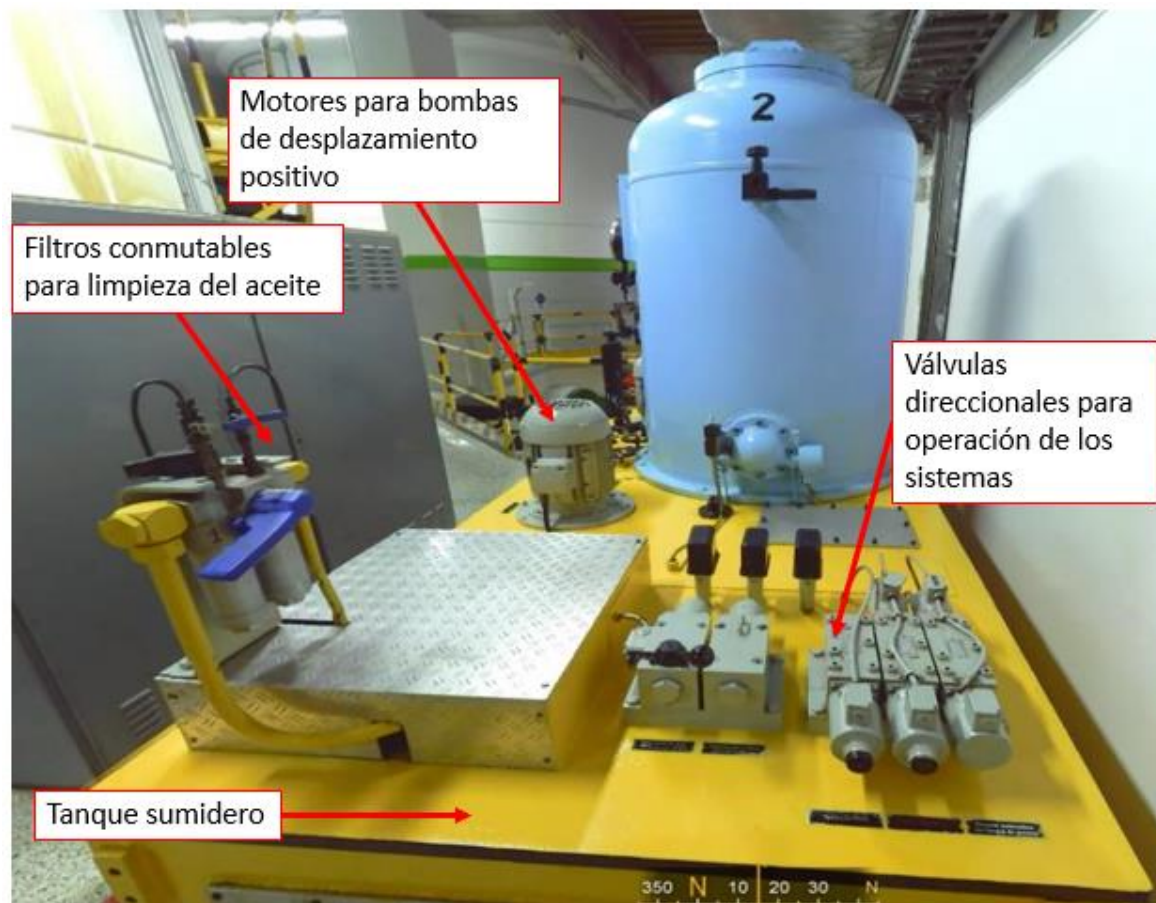


Figura 8. Unidad hidráulica Central Hidroeléctrica Guatapé

5.2.2 Sistema By-pass

Este sistema se encarga de llenar de agua el distribuidor de chorros de la turbina e igualar las presiones en ambos lados del rotor-obturador de la válvula antes de su apertura. Este sistema está compuesto por un conjunto de tuberías con un menor diámetro que la conducción, una válvula que controla el accionamiento de este sistema (usualmente se utilizan válvulas de aguja) y válvulas de guarda que permiten el cierre del sistema para mantenimientos. Estos sistemas deben trabajar de acuerdo con las condiciones de la conducción.



Figura 9. Válvula esférica con Bypass Vortex Hydra Valves
Tomado de: (Vortex Hydra Innovation & Engineering, 2022)

El sistema by-pass es crucial para el procedimiento de apertura de la válvula ya que es el que permite suministrar la presión requerida al servomotor y realizar el movimiento.

5.2.3 Sistema contrachorro

El sistema contrachorro, también denominado *tobera de frenado*, tiene como función disminuir el tiempo que tarda la unidad en detenerse totalmente y lo realiza al inyectar un chorro de agua a la parte posterior de los cangilones produciendo un torque inverso al giro normal de la unidad.

El agua para este sistema proviene de la tubería de presión, aguas arriba de la válvula de admisión. Los elementos con los que cuenta este sistema son los siguientes:

- *Tubería y accesorios*: se diseñan para soportar la presión de la conducción.
- *Válvula de control*: se encarga del accionamiento del sistema.
- *Válvulas de guarda*: son utilizadas para el cierre del sistema y poder realizar mantenimiento de los equipos.
- *Boquillas*: Situadas en el recinto de la turbina. Se encargan de direccionar el chorro de agua en la parte posterior del cangilón y producir una reacción opuesta al sentido de giro del rodete. La ubicación de este elemento es crucial tanto para el funcionamiento del sistema como para evitar graves daños en la unidad.

Este sistema contrachorro es para uso exclusivo en caso de emergencia ya que los cangilones no se diseñan para trabajar sostenidamente bajo tales condiciones; es decir, se aumenta el riesgo de sufrir daños graves en el estado de la unidad.

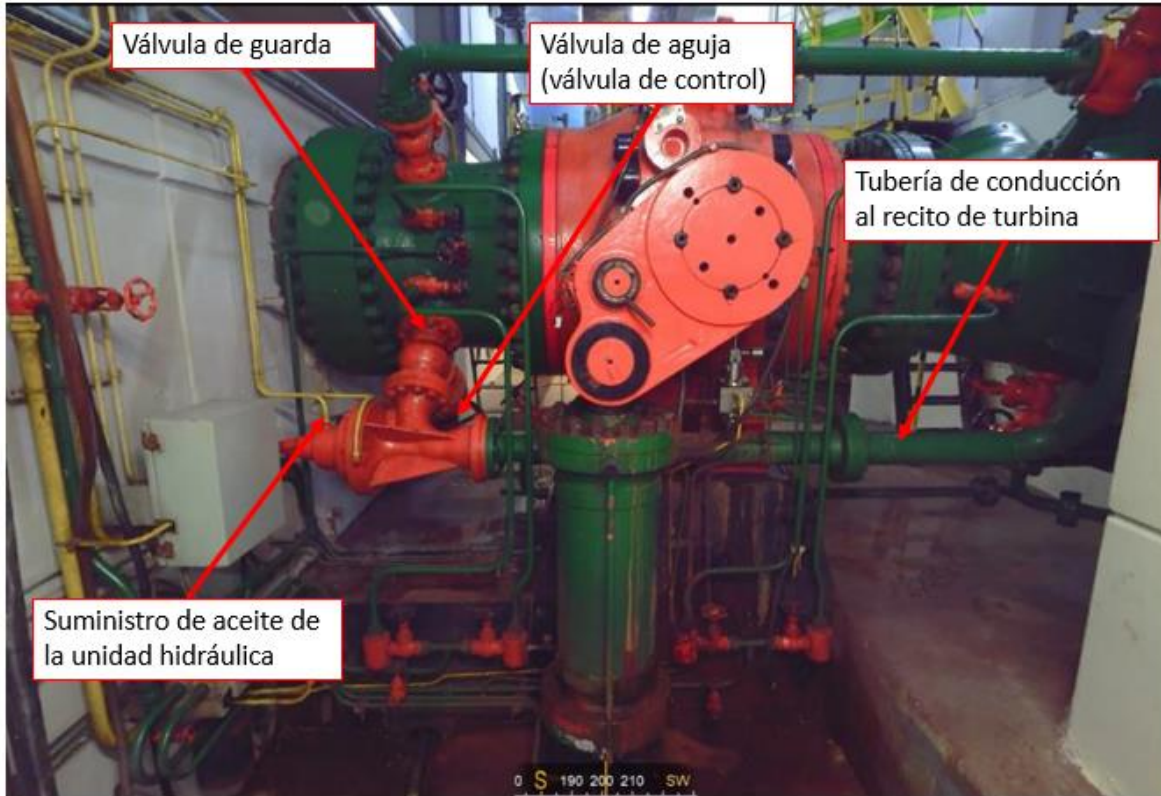


Figura 10. Sistema contrachorro Central Hidroeléctrica Guatapé

5.2.4 Sistema de mando

El sistema de mando de la válvula es constituido principalmente por servomotores, encargados de operar las válvulas de admisión de las turbinas, ya sea por medio de aceite o por agua a presión contenida en la tubería de conducción.



Figura 11. Válvula esférica con accionamiento por servomotor Adams Switzerland
Tomado de (ADAMS Switzerland, 2020)

Los actuadores pueden ser operados por dos tipos de fluidos, agua o aceite. En el caso de contar con un sistema operado por agua, se utiliza el agua de la conducción tal como se presenta en un sistema de pilotaje realizado por agua: una toma ubicada aguas arriba de la válvula conduce el fluido al servomotor para permitir la apertura de la válvula de admisión y para el caso contrario se utiliza una toma aguas abajo. Como se mencionó en el numeral 5.2.1.1, en este tipo de sistema, el pilotaje y el mando conforman un mismo sistema por lo que sus elementos son compartidos.

El uso de agua para el sistema de mando es ventajoso en centrales hidroeléctricas que trabajan bajo altas presiones porque este recurso puede aprovecharse para un doble propósito. Por lo tanto, como las centrales con turbinas tipo Pelton disponen de altas cabezas hidráulicas, entonces generalmente cuentan con un sistema de mando por medio de agua para la operación de las válvulas. Lo anterior se puede evidenciar en las centrales hidroeléctricas mencionadas en el numeral 5.2.1 Pilotaje del Sistema de mando de la válvula, la central hidroeléctrica Guatapé y la central hidroeléctrica Guavio.

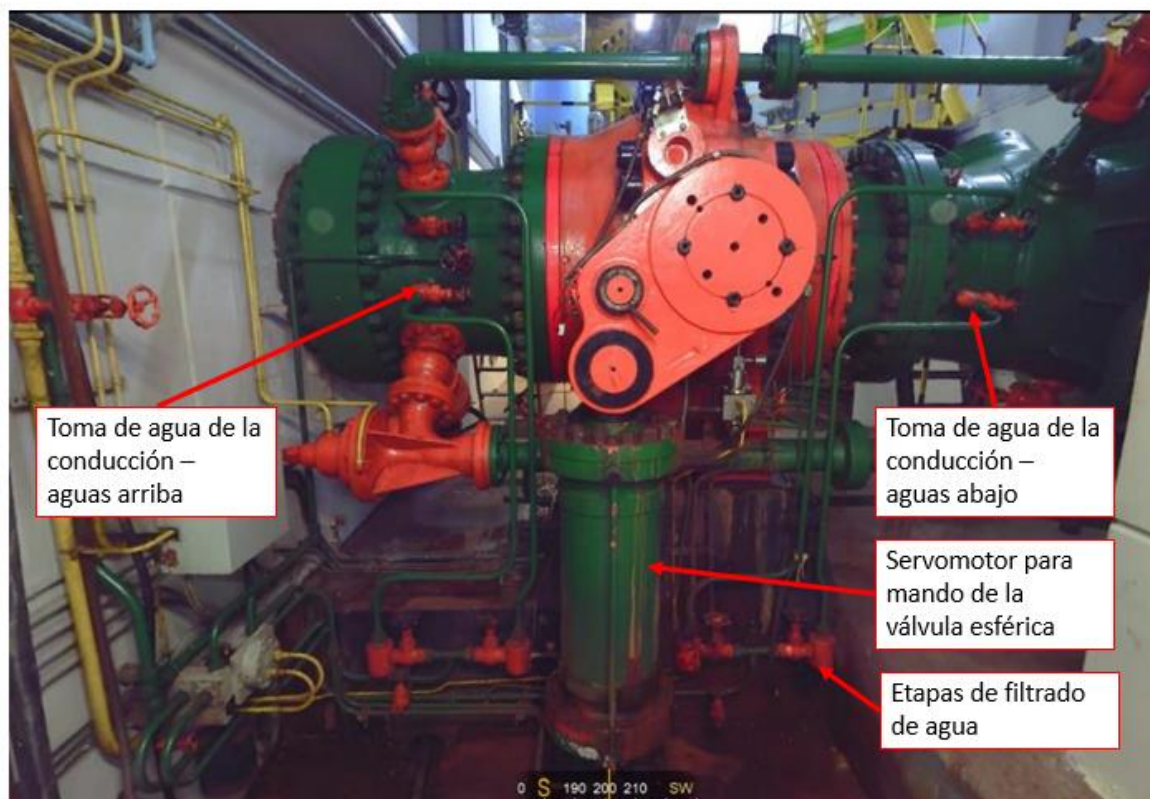


Figura 12. Sistema de mando en la Central Hidroeléctrica Guatapé.

Los sistemas de mando operados por medio de aceite utilizan unidades hidráulicas que suministren la presión requerida para que el actuador accione la válvula. Estos sistemas son utilizados en centrales con condiciones de operación de baja presión ya que sus equipos deben ser bastante robustos como para cumplir los requerimientos de la válvula para su movimiento. Es decir, la presión con la cuenta el agua dirigida por la conducción es baja, por lo que, los sistemas de mando de las válvulas esféricas se pueden realizar con aceite de manera que este fluido permita generar una fuerza suficiente para operar el cuerpo giratorio de la válvula esférica y también contar con un fluido limpio y en buenas condiciones para su funcionamiento.



Figura 13. Sistema de mando hidráulico.
Tomado de (Vortex Hydra Innovation & Engineering, 2022)

En los dos tipos de sistemas de mando se puede encontrar la implementación de contrapesos. En ese caso, el actuador solo realiza el movimiento de apertura y el contrapeso se encargará de realizar el cierre de la válvula (tendencia al cierre) con el fin de garantizar un tiempo de cierre corto, y proteger la turbina y demás equipos adyacentes ante alguna emergencia.

6 DIMENSIONAMIENTO DE LA CENTRAL

En este numeral se describen los sistemas presentes actualmente en la Central Hidroeléctrica Guatapé, perteneciente a Empresas Públicas de Medellín, con el fin de desarrollar un caso de aplicación, cumpliendo el objetivo específico 3 en el numeral 3.1.2. Estas características son de gran importancia para la primera etapa de la metodología y para el proceso de diseño del sistema modernizado. Toda la información descrita en este numeral fue suministrada por Empresas Públicas de Medellín, contando con la autorización

del jefe de la Central Oscar Alberto Restrepo Álvarez y el gerente de Generación de Energía de la región central Jaime Alberto González González.

6.1 CARACTERISTICAS GENERALES

La central hidroeléctrica Guatapé se encuentra ubicada al oriente del departamento de Antioquia, aproximadamente a 100 km de la ciudad de Medellín. La Casa de Maquinas se encuentra en el sector conocido como “La Araña”, jurisdicción del municipio de San Rafael, Antioquia.

El embalse tiene una capacidad de 1.236 millones de metros cúbicos. Este embalse almacena las aguas del río Nare y las desvía al río Guatapé, aprovechando 810 metros de altura que se diferencian de estas dos cuencas.

La central es subterránea y tiene una capacidad de 560 MW, entregada por ocho unidades generadoras de igual capacidad, accionadas por turbinas Pelton de eje vertical. Esta central fue construida en dos etapas, la primera puesta en servicio en 1972 y la segunda en 1979.

Cada unidad de generación cuenta con una válvula de admisión con un diámetro nominal de 1000 mm, que a su vez cada una cuenta con los sistemas auxiliares descritos en el numeral 5.2 con las siguientes características:

6.1.1 Unidad hidráulica

La unidad hidráulica de cada unidad de generación de la central Guatapé se encarga de operar el regulador de velocidad, el pilotaje de mando de la válvula y el accionamiento de la válvula de aguja del sistema By-Pass y sistema contrachorro.



Figura 14. Unidad hidráulica vinculada a unidad de generación de la Central Hidroeléctrica Guatapé

La unidad suministra parte del aceite a los servomotores que se encuentran al interior de los inyectores, que a su vez conforman el regulador de velocidad de la turbina. Los servomotores, de simple accionamiento, producen el movimiento lineal de un vástago con punta de aguja para regular el paso de agua hacia los cangilones y controlar así la velocidad de giro del rodete de la máquina.

Otra parte del aceite de la unidad hidráulica es dirigido hacia la válvula de aguja del sistema By-Pass. Su filosofía de funcionamiento es similar a los inyectores, pero en este caso cuenta con doble accionamiento lo que indica que dentro de la válvula existen dos cámaras hacia las cuales se puede dirigir el aceite para su operación; una para la apertura y otra para el cierre. El mismo principio de funcionamiento se aplica a la válvula de agua del sistema contrachorro.

Por último, la unidad suministra aceite al pilotaje del sistema de mando de la válvula. El pilotaje es realizado por medio de una válvula tipo Chamber, que, mediante aceite, produce la rotación de un vástago similar a un cigüeñal, para permitir la apertura de las cámaras donde ingresa el agua tomada de la conducción. En la Figura 15 se muestra este equipo con su conexionado.



Figura 15. Válvula Chamber Central hidroeléctrica Guatapé

6.1.1.1 Elementos de la unidad hidráulica

Para cumplir con las condiciones de operación de los sistemas que requieren aceite, la unidad hidráulica cuenta con los siguientes elementos:

- Tanque sumidero.
- Dos bombas de aceite.
- Válvulas direccionales.
- Válvulas de seguridad.
- Filtros.
- Tanque de aceite a presión.
- Interruptores de presión.

6.1.1.1.1 Tanque sumidero

Es el lugar donde se almacena el aceite de la unidad, tiene un volumen de 4.500 l y unas dimensiones de 1,5 m de ancho, 2,9 m de largo y 0,8 m de alto.

6.1.1.1.2 Bombas de aceite

Son bombas de desplazamiento positivo con una capacidad de 52 l/min. Se encuentran montadas de forma vertical al tanque sumidero incluyendo sus respectivos motores.

6.1.1.1.3 Tanque de aceite a presión

La unidad hidráulica cuenta con un tanque que le permite al sistema contar con la presión requerida y garantizar el funcionamiento de los elementos a los cuales se les suministra el aceite. Esto es, un recipiente que contiene aceite y que se presuriza inyectando aire comprimido por la parte superior. Su implementación garantiza, por un lado, una cantidad determinada de accionamientos de los sistemas controlados y por otro, prevenir mantenimientos frecuentes y alargar la vida útil de la bomba, al limitar su operación continua.

Para controlar el encendido y apagado del sistema de bombeo, el tanque cuenta con medidores de nivel y de presión que indicarán cuando es requerido el suministro del fluido y cuando es posible apagar el sistema de bombeo.

Las características de la unidad hidráulica actualmente instalada son las siguientes:

Tabla 1. Características unidad hidráulica para pilotaje de sistema de mando

UNIDAD HIDRÁULICA			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
1	Capacidad de cada bomba de aceite del regulador	82	l/min
2	Presión máxima de trabajo	39	Kg/cm ²
3	Presión mínima de trabajo	28	Kg/cm ²
4	Potencia de los motores de las bombas de aceite del regulador	8,6	kW
5	Capacidad de cada compresor	6,6	m ³ /h
6	Potencia del motor del compresor	1,5	kW
7	Volumen total del tanque de presión	1.160	l
8	Volumen total del tanque sumidero de aceite	4.500	l
9	Dimensiones totales del tanque de presión		
	· Diámetro	1.000	mm
	· Altura	1.800	mm
10	Dimensiones totales del gabinete del actuador		
	· Altura	2.800	mm
	· Ancho	1.520	mm
	· Longitud	2.920	mm
9	Cantidad de aceite requerido para llenar el sistema de regulación de una unidad incluyendo los servomotores	2.300	l

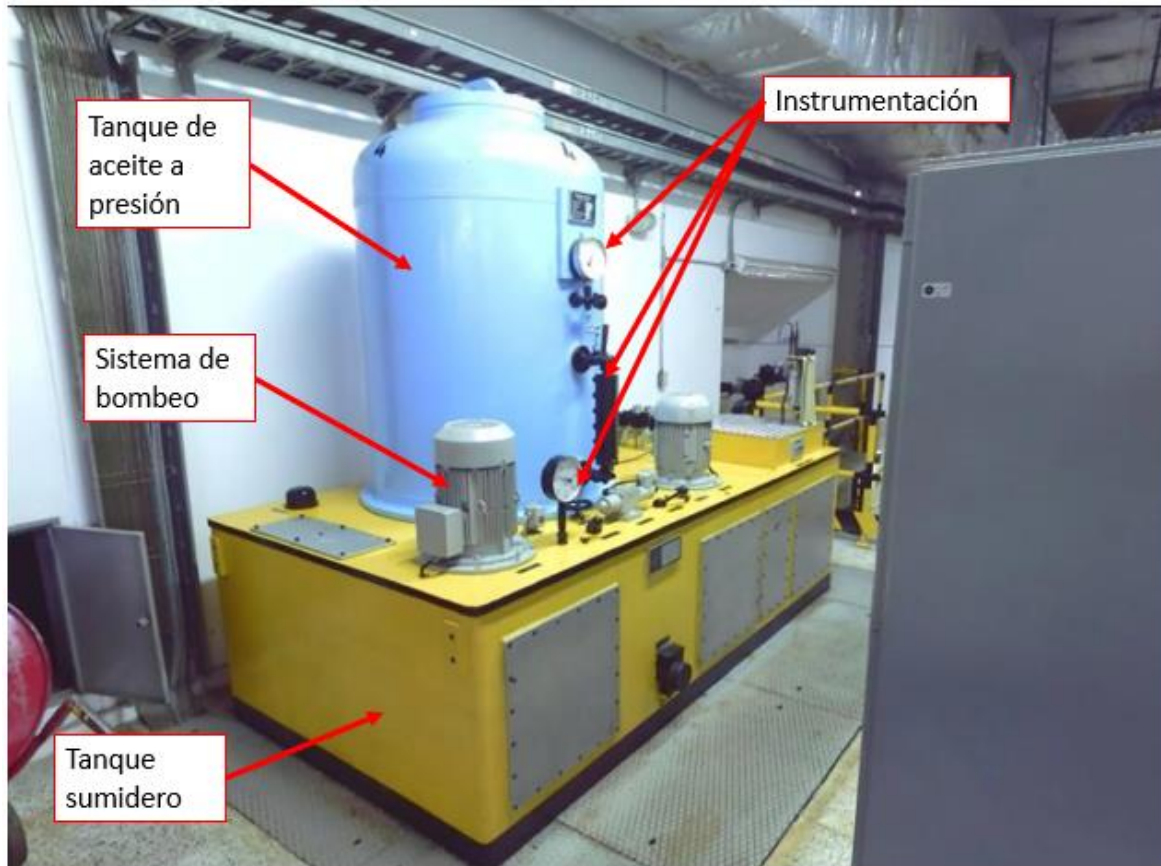


Figura 16. Unidad oleo-hidráulica dimensionada

6.1.2 Sistema By-Pass

Cada una de las válvulas de admisión cuenta con un sistema by-pass que conecta la tubería aguas arriba de la válvula y distribuidor de cada turbina. Se compone por una tubería de acero al carbono de diámetro nominal de 100 mm.

El sistema by-pass cuenta con una válvula de guarda que al cerrar el paso permite ejecutar acciones de mantenimiento. La válvula de guarda se encuentra aguas arriba de la válvula esférica.

El distribuidor de la turbina se controla mediante una válvula tipo aguja accionada por un servomotor. El servomotor es operado por aceite a presión suministrado por la unidad hidráulica.

Incluyendo en el alcance del sistema, en cada válvula esférica se tiene instalada una tubería de drenaje con conexiones bridadas aguas arriba y aguas abajo, las cuales cuentan con válvulas de guarda tipo compuerta de accionamiento manual para mantenimiento. Este sistema se encarga principalmente de drenar el agua presente en la válvula cuando se requiera. Como este sistema consta principalmente de tuberías y válvulas manuales, es incluida en el alcance de este sistema by-pass.



Figura 17. Sistema By-pass dimensionado



Figura 18. Sistema By-Pass Dimensionado



Figura 19. Sistema de drenaje en la válvula esférica

Los elementos que conforman el sistema by-pass tienen las siguientes características:

- Tubería en acero al carbono de diámetro DN100
- Válvula de aguja con servomotor de aceite DN100, PN100
- Válvulas de guarda aguas arriba y aguas abajo DN100, PN100

Los elementos que conforman el sistema de drenaje de las válvulas esféricas y del distribuidor tienen las siguientes características:

- Tubería en acero al carbono de diámetro DN80
- Válvulas de guarda en la conexión a la válvula esférica y en el distribuidor de chorros de la turbina.

6.1.3 Sistema contrachorro

Cada válvula esférica cuenta con un sistema contrachorro compuesto por los siguientes elementos:

- Tubería fabricada en acero al carbono DN 150 mm.
- Válvula de aguja encargada del accionamiento del sistema. Fabricada en acero al carbono GS45.3 y vástago intercambiable en aleación de acero AISI 4024 y su punta en el mismo material.
- Válvulas de guarda tipo compuerta DN150 mm y presión de trabajo de 100 bar, fabricadas en acero al carbono con accionamiento manual.
- Accesorios y boquilla fabricados en acero al carbono.
- Pernos y sellos para las conexiones bridadas.

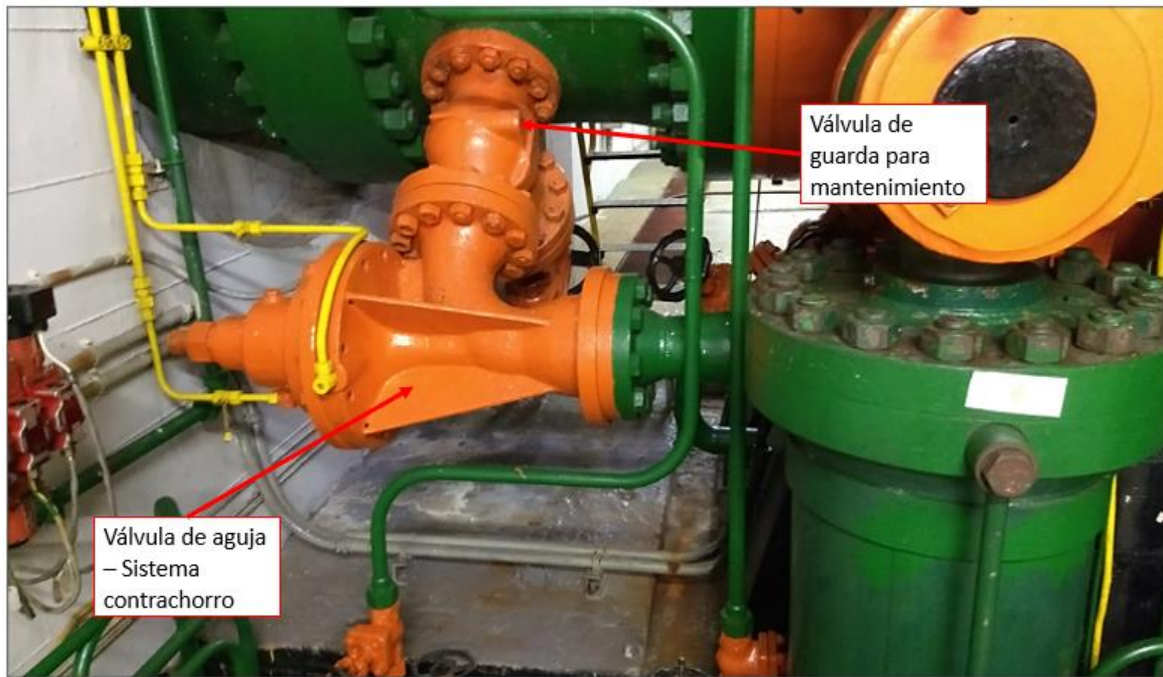


Figura 20. Válvula de aguja sistema contrachorro dimensionado



Figura 21. Sistema contrachorro dimensionado

6.1.4 Sistema servomotor

Para el accionamiento de la válvula se cuenta con un servomotor de doble accionamiento operado con agua a presión proveniente de la tubería que alimenta a la turbina. Este sistema cuenta con los siguientes elementos:

- Tuberías en acero al carbono desde ½" hasta 1 ½".
- Uniones (nipples) para conexiones de la tubería a los accesorios y a la válvula esférica.
- Válvulas de compuerta de DN 25 mm y 15 mm con presión de trabajo de 100 bar.
- Filtros para limpieza del agua.
- Servomotor de accionamiento

El servomotor cuenta con las siguientes características:

Tabla 2. Características del servomotor de accionamiento

SERVOMOTOR	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Material	A37 revestimiento en nickel EP 5/100 – EN 10025
Capacidad del servomotor	110 l
Diámetro interior	400 mm
Carrera normal del servomotor	890 mm
Tiempo de cierre ajustable	Entre 90 y 150 s
Tiempo de apertura ajustable	Entre 90 y 150 s

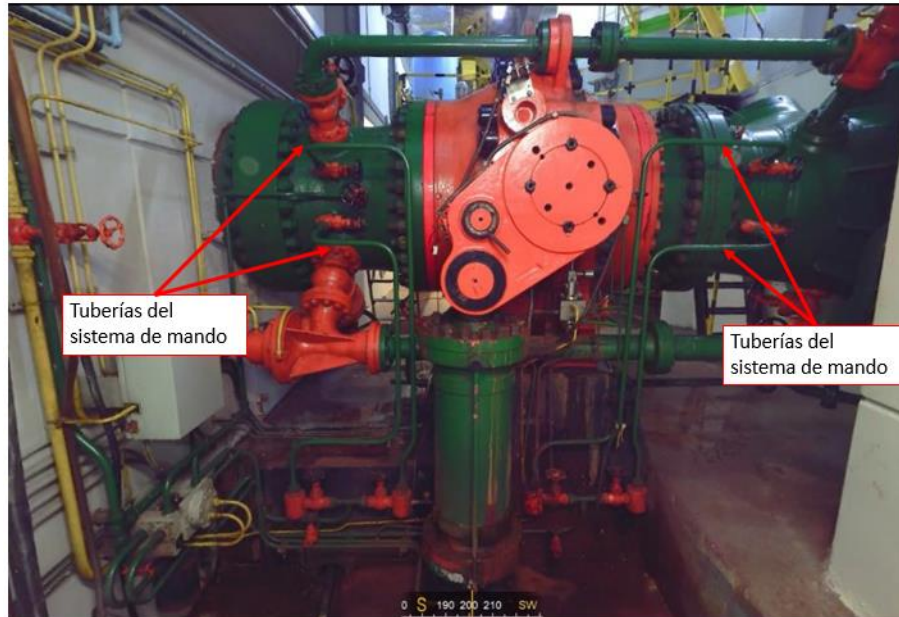


Figura 22. Sistema de mando Central Hidroeléctrica Guatapé



Figura 23. Servomotor dimensionado.

7 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

7.1 INTRODUCCIÓN

La metodología para la modernización de los sistemas auxiliares mecánicos presentes en una válvula esférica para centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton consta de dos etapas denominadas estudios previos y desarrollo técnico.

Previamente a la descripción de estas etapas, se aclara que esta metodología es aplicable a otros sistemas presentes en la central hidroeléctrica, donde los entregables en cada uno de sus pasos serían acordes al sistema en cuestión.

Esta metodología se aplica para que los entregables, como resultado de esta, permitan realizar un proceso de licitación donde diferentes fabricantes presenten ofertas para la fabricación de los sistemas modernizados y adquirir el procedimiento de fabricación, suministro, montaje y puesta en marcha de estos. Por lo tanto, el alcance de este procedimiento no incluye dicho proceso de licitación, cuenta únicamente con el desarrollo de los documentos requeridos para este proceso.

Como primera etapa de la metodología se encuentran los estudios previos. Esta etapa, se encarga únicamente de identificar con claridad el sistema que se encuentre instalado actualmente en la central hidroeléctrica de acuerdo con toda la información disponible. En esta etapa se desarrollan los siguientes pasos:

- Levantamiento de información.
- Filosofía de funcionamiento.
- Listado de elementos a cambiar.
- Criterios de diseño.
- Consultas a fabricantes e Informe de alternativas.

Como segunda etapa de la metodología está el desarrollo técnico, donde se realizará el diseño del sistema modernizado teniendo en cuenta toda la información obtenida en la etapa previa. Esta etapa cuenta con los siguientes pasos:

- Memorias de diseño.
- Simulación.
- Integración 3D.
- Elaboración de planos.
- Presupuestos
- Especificaciones técnicas.

En este capítulo se da cumplimiento al objetivo específico 4 descrito en el numeral 3.1.2.

7.2 MANEJO DE LA INFORMACIÓN

En la implementación, a lo largo de la metodología se manejarán grandes cantidades de información y documentos, por lo que es clave el manejo y la organización de estos documentos. Para ello, la empresa consultora debe definir un sistema de gestión de la información que permita llevar una trazabilidad de los documentos generados durante el

desarrollo del proyecto, definir estructuras de comunicación y demás estrategias de administración de información que permitan un manejo eficiente de los datos durante el proyecto. Todo lo mencionado anteriormente depende específicamente de la empresa por lo tanto no se encuentra en el alcance de esta metodología.

7.3 ESTUDIOS PREVIOS

El objetivo inicial de esta primera etapa es principalmente la identificación y reconocimiento completo del sistema a modernizar. Para cumplir con lo anterior, se desarrolla una estructura donde el resultado de cada actividad lleva al desarrollo de la siguiente. En el esquema que se presenta a continuación se muestra el orden en el que se desarrolla esta etapa de la metodología de modernización.

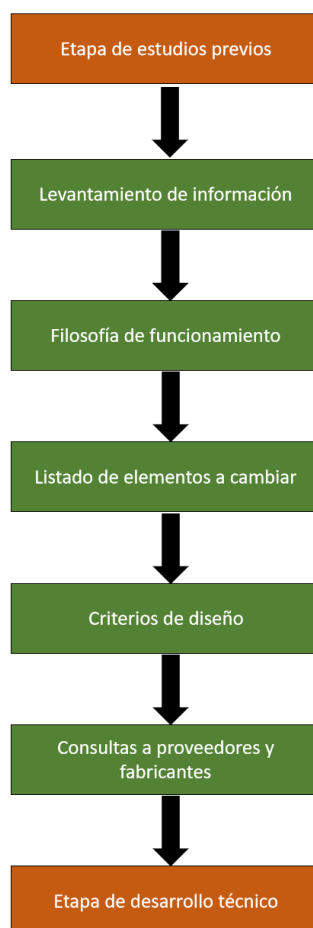


Figura 24. Estructura de la etapa de estudios previos

Organizar todos los documentos existentes a lo largo de esta etapa es clave y, por lo tanto, se propone la siguiente estructura de carpetas donde cada una es consecuente a cada paso de la estructura previamente ilustrada.

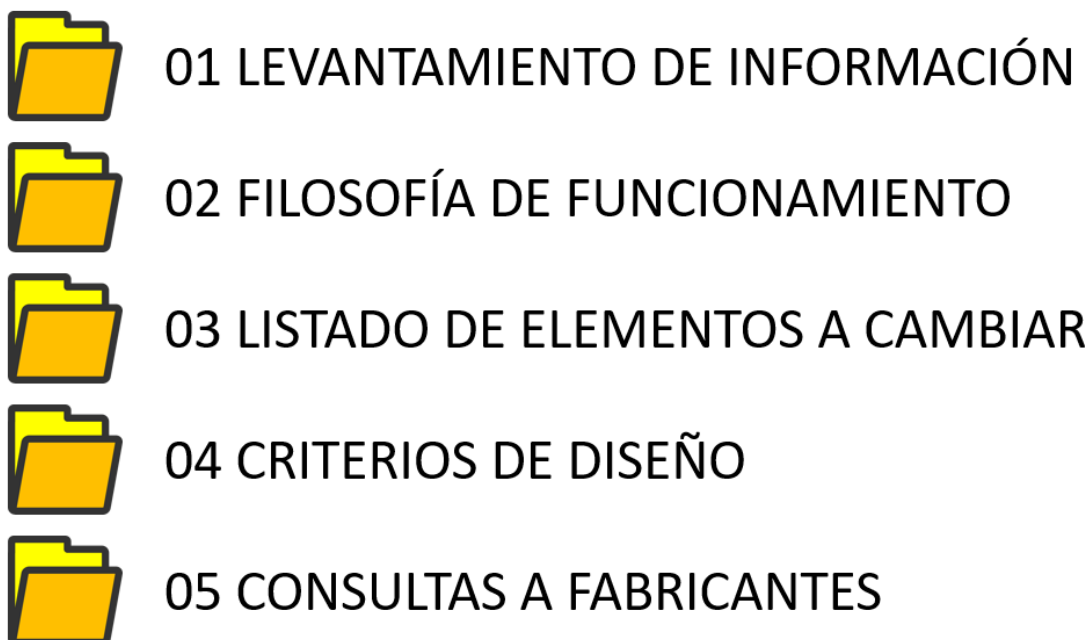


Figura 25. Estructura de carpetas – Etapa de estudios previos

7.3.1 Levantamiento de información

Como primer paso en la etapa de estudios previos se encuentra el levantamiento de información, donde se realiza la búsqueda de todos los documentos relacionados con el sistema a modernizar.

El cliente es fundamental porque es el principal proveedor de los planos de fabricación, especificaciones técnicas del sistema, esquemas y/o diagramas de flujo, dossiers de fabricación, hojas de datos, historiales de mantenimiento y demás información relevante que le permita al diseñador identificar todos los elementos, características, actuales problemas y posibles optimizaciones del sistema.

Por otro lado, el diseñador debe realizar una visita a la central con el fin de tomar mediciones tanto de los sistemas como de los espacios donde se encuentra ubicada la válvula esférica, corroborar información, identificar posibles interferencias y conocer, de la mano con el personal de la central las experiencias de la operación del sistema actualmente instalado.

Toda la información recopilada debe ser guardada en la carpeta designada que se muestra en la Figura 25. Dentro de esta carpeta se debe diferenciar la fuente de la información obtenida que, como se mencionó anteriormente, puede ser entregada por el cliente o levantada en la visita de campo.

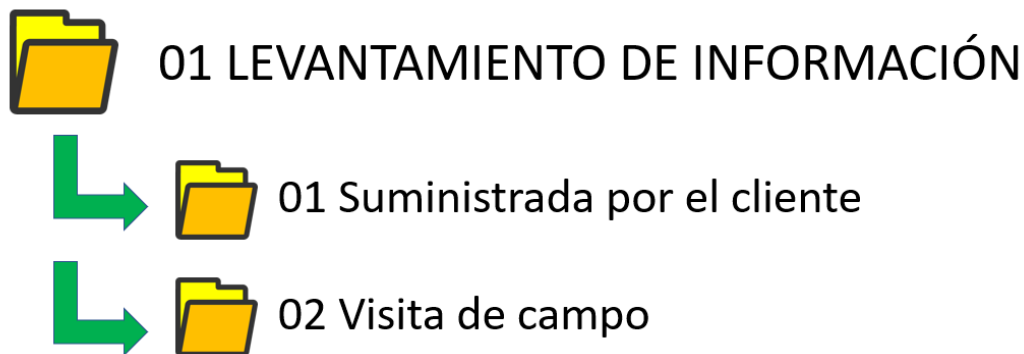


Figura 26. Estructura de carpetas – levantamiento de información

7.3.1.1 Información suministrada por el cliente

Toda la información entregada por el cliente debe ser por los canales designados entre la empresa y el cliente. Los documentos son almacenados en una carpeta interna del levantamiento de información tal como se muestra en la Figura 26.

Para mayor facilidad en la búsqueda de información lo recomendable es clasificar estos documentos de acuerdo con los elementos del sistema. Durante la revisión de los documentos se identificarán los elementos principales que hacen parte del sistema, para los que se encuentran en nuestro alcance se consideran los siguientes:

1. Pilotaje del sistema de mando
 - a. Tanque sumidero
 - b. Sistema de bombeo
 - c. Tanque acumulador
 - d. Tuberías
 - e. Instrumentación
 - f. Esquemas, diagramas y planos generales
2. Sistema By-Pass y drenaje
 - a. Tubería
 - b. Válvula de accionamiento
 - c. Válvulas de guarda
 - d. Esquemas, diagramas y planos generales
3. Sistema contrachorro
 - a. Tubería
 - b. Válvula de accionamiento
 - c. Válvulas de guarda
 - d. Esquemas, diagramas y planos generales
4. Sistema de mando
 - a. Servomotor actuador
 - b. Tuberías
 - c. Válvulas
 - d. Instrumentación

e. Esquemas, diagramas y planos generales

7.3.1.2 Visita de campo

Para complementar la información recibida por el cliente se deben realizar visitas a la central hidroeléctrica para identificar, en primera persona, los sistemas de acuerdo con la información recibida y más importante aún, posibles modificaciones realizadas a lo largo de la operación de la central que no se muestren en los planos de fabricación o informes de la central hidroeléctrica.

Durante la visita se deben realizar mediciones de los sistemas, identificar las fallas, procedimientos de mantenimiento que se realicen a los sistemas actuales, posibles dificultades que se puedan tener durante el desmontaje de los sistemas y los espacios que se tengan en el recinto donde se encuentren las válvulas esféricas. Todo eso debe ser respaldado con un registro fotográfico el cual será guardado en la carpeta de visita de campo del levantamiento de información, de preferencia que sea guardada en una carpeta interna con la referencia de la fecha de la visita.

Adicionalmente a las dimensiones de los sistemas, es recomendable contar con un mapeo por medio de nube de puntos de la caverna y específicamente de los espacios donde se encuentran ubicados los sistemas con el fin de poder contar con un modelo 3D que será de gran utilidad en la integración 3D (Ver numeral 7.4.3) desarrollada en la etapa de desarrollo técnico.

7.3.1.3 Informe de levantamiento de información

Para consolidar toda la información obtenida en este paso, se prepara un informe de levantamiento donde se presentará lo siguiente:

- Objetivo del levantamiento
- Descripción del sistema a modernizar
- Información obtenida por parte del cliente
- Información obtenida por parte del levantamiento en visita de campo
- Identificación de restricciones y falencias del sistema
- Información faltante
- Conclusiones

Es de vital importancia presentarle al cliente las restricciones y falencias evidenciadas en el levantamiento de los sistemas durante la visita de campo, ya que esto define el alcance de modernización de los sistemas. Estas limitaciones son generadas ya sea debido a como se encuentra instalado el sistema actualmente, las dificultades que se pueden presentar al momento de desmontar los equipos, los procedimientos que afecten áreas o frentes que no estén incluidos en el alcance del proyecto o por requerimientos del cliente.

Para complementar el informe de levantamiento, se realiza una tabla como anexo a este documento donde se resume la información obtenida, tal como placa de características, ubicación, cantidad, foto de la ubicación del equipo, especificaciones y dimensiones. En este anexo se recomienda hacer uso de todas las imágenes tomadas en la visita de campo, con el fin de contar con evidencias de las características de los equipos instalados actuales, ubicaciones y condiciones.

La tabla de recopilación de información cuenta con la siguiente estructura:

Tabla 3. Tabla para levantamiento de información para visita de campo

Nombre o designación	Foto placa de características	Ubicación	Cantidad	Foto de la ubicación	Especificaciones	Dimensiones

7.3.2 Filosofía de funcionamiento

Analizada la información recopilada, se procede a describir cómo funciona actualmente el sistema. El resultado de este paso es contar con un informe de la descripción detallada del funcionamiento del sistema, especificando claramente los elementos del sistema, las funciones que realizan y cómo interactúan entre ellos. Este procedimiento debe estar soportado por los esquemas, planos, diagramas e imágenes que se encuentren en la información de entrada de manera que se pueda referenciar cada uno de los tags (nombres o designaciones de los equipos) mencionados en los documentos y presentarle al lector una interpretación más sencilla del sistema. Durante la elaboración de este documento se recomienda contar con comentarios respecto al personal de operación de la central para obtener comentarios de fallas y recomendaciones de mejora.

7.3.2.1 Filosofía de funcionamiento en Pilotaje del sistema de mando

Para comenzar la descripción del funcionamiento del pilotaje del sistema de mando, se debe referenciar todos los planos, esquemas y diagramas obtenidos en el levantamiento de los cuales se determinó su funcionamiento y que faciliten la comprensión del contenido del informe.

En este informe se debe comenzar por mencionar el aceite hidráulico utilizado, las características y propiedades que éste presenta tal como densidad, viscosidad, temperatura de trabajo y demás información referenciada por la hoja de datos del proveedor.

La descripción de los equipos que conforman la unidad hidráulica se realizará de acuerdo con el siguiente orden:

- Tanque sumidero
- Bombas
- Filtración
- Tanque de aceite a presión
- Suministro de aire a presión
- Electroválvulas

7.3.2.1.1 Tanque sumidero

En la descripción del tanque sumidero se debe especificar el tag con el que cuenta en los planos, qué capacidad tiene, material de fabricación y dimensiones. Luego, se deben mencionar todos los dispositivos de protección con los que cuenta, ya sea medidores de temperatura y nivel, los límites programados y describiendo cómo reacciona y responde el sistema cuando el aceite llegue a dicho valor.

7.3.2.1.2 Bombas

En este apartado se debe describir de forma detallada las bombas con las que cuenta la unidad hidráulica, cantidad, características y capacidades. De acuerdo con los planos referenciados se debe mencionar a cuáles equipos suministra aceite y los rangos de operación en los cuales la bomba es encendida o apagada.

7.3.2.1.3 Filtración

En la descripción de los filtros se debe mencionar su tipo y capacidad de filtración, al igual que los equipos que monitorean el estado de estos e indican cuándo se les debe hacer mantenimiento o ser reemplazados.

7.3.2.1.4 Tanque de aceite a presión

La descripción del tanque de aceite a presión debe contar con su tag designado, capacidad y presión máxima de operación. De igual manera, se debe mencionar cada uno de los instrumentos de medición que se utilizan en este equipo como manómetros, indicadores de nivel y demás elementos que aseguren el buen funcionamiento y protección de este.

7.3.2.1.5 Suministro de aire a presión

Para el funcionamiento del tanque de aceite a presión, se debe contar con un suministro de aire a presión (sistema de aire comprimido) que permite mantener a una presión constante el sistema sin una operación continua de las bombas. En este ítem se debe mencionar cómo es dicho suministro del aire al tanque a presión, por cuáles válvulas se realiza y con cuáles elementos de seguridad cuenta para monitoreo y pérdidas que presente en su operación.

7.3.2.1.6 Válvulas direccionales

Para el funcionamiento de cada uno de los sistemas a los cuales se les suministra aceite, la unidad debe contar con válvulas direccionales que controlen el paso del fluido y la operación de los actuadores de dichos sistemas.

Para el caso tratado en esta metodología se debe realizar una descripción de las válvulas que controlan el fluido tanto a los inyectores de la turbina, a la válvula de aguja del sistema By-Pass, a la válvula de aguja del sistema contrachorro y al actuador que realiza el pilotaje del sistema de accionamiento de la válvula esférica.

7.3.2.2 Filosofía de funcionamiento Sistema By-Pass

Como se menciona en el numeral 7.3.2, este documento debe estar soportado por los documentos, esquemas, planos y demás documentos obtenidos durante el levantamiento de información. Para este informe, se debe definir claramente como son las secuencias de accionamiento del sistema by-pass y cómo este influye en la apertura y cierre de la válvula esférica. Esto implica, mencionar que elementos son encargados de su funcionamiento, en qué condiciones de operación realizan su función y cómo la realizan.

Esta descripción es de suma importancia debido a que, considerando que no se realiza un cambio de la válvula esférica, el sistema modernizado debe obedecer con la filosofía de operación del sistema actual, cumpliendo con el fin de esta metodología, el cual es aumentar la vida útil de los equipos presentes en los sistemas auxiliares mecánicos.

7.3.2.3 Filosofía de funcionamiento Sistema Contrachorro

Como se menciona en el numeral 7.3.2, este documento debe estar soportado por los documentos, esquemas, planos y demás documentos obtenidos durante el levantamiento de información. Para este informe, se debe definir claramente como son las secuencias de accionamiento del sistema contrachorro. Esto implica, mencionar que elementos son encargados de su funcionamiento, en qué condiciones de operación realizan su función y cómo la realizan.

De igual forma, se debe mencionar en qué casos este sistema debe ser operado para intervenir la rotación del rodete y el tiempo cuando se detiene la turbina cuando este sistema contrachorro es accionado.

Esta descripción es de suma importancia debido a que, considerando que no se realiza un cambio del rodete ni de la turbina, el sistema modernizado debe obedecer con la filosofía de operación del sistema actual, cumpliendo con el fin de esta metodología, el cual es aumentar la vida útil de los equipos presentes en los sistemas auxiliares mecánicos.

7.3.2.4 Filosofía de funcionamiento Sistema de accionamiento

Como se menciona en el numeral 7.3.2, este documento debe estar soportado por los documentos, esquemas, planos y demás documentos obtenidos durante el levantamiento de información. Para este informe, se debe definir claramente como son las secuencias de operación del sistema de accionamiento. Esto implica, mencionar que elementos son encargados de su funcionamiento, en qué condiciones de operación realizan su función y cómo la realizan. Adicionalmente, se debe incluir la fuerza que debe generar el servomotor para operar la válvula esférica y el tiempo de operación de esta válvula. Esto es de suma importancia debido a que estos valores no serán cambiados, ya que la válvula esférica continuará siendo la misma.

7.3.3 Listado de elementos a cambiar

Dentro de la primera etapa de estudios previos se debe dejar claro y pactado el alcance en la modernización de cada uno de los sistemas de acuerdo con los requerimientos del cliente, restricciones que generen impedimentos en procesos de desmontaje y montaje o que simplemente afecten la eficiencia y funcionamiento futuro del sistema. Con este fin, se debe realizar un listado de elementos a cambiar donde se describen cada uno de los equipos que serán reemplazados, con sus características, materiales, estándares de diseño con los que fueron fabricados y cantidades. Esto permitirá identificar los límites de suministro para el cliente y las características de los elementos actuales para en la etapa posterior realizar una comparación con los elementos a utilizar en el sistema modernizado.

Para cada sistema se debe realizar un documento que liste lo anteriormente mencionado, de acuerdo con la siguiente estructura.

Tabla 4. Tabla de listado de elementos a cambiar

LISTA DE ELEMENTOS A CAMBIAR					
ÍTEM	DENOMINACIÓN	DIMENSIONES [m]	CANTIDAD [Unidad]	CALIDAD	ESTANDAR

7.3.4 Criterios de diseño

El informe de criterios de diseño es el documento de mayor importancia en la etapa de estudios previos, ya que en este se definirán las pautas, características, propiedades y estándares para tener en cuenta para el diseño del sistema modernizado en la etapa de desarrollo técnico.

Para comenzar los criterios de diseño se debe dejar claro el alcance de la modernización del sistema al que pertenece el documento en conformidad con el listado de elementos a cambiar. Esto es de suma importancia para no presentar inconvenientes o desacuerdos con el cliente en la etapa posterior que generen reprocesos.

7.3.4.1 Normas y estándares

En primer lugar, cada uno de los diseños presentes en la modernización de los sistemas deben estar respaldados por normas y estándares avalados ya sea nacional o internacionalmente con el fin de realizar las labores bajo procedimientos verificados y aprobados de acuerdo con las condiciones de cada sistema.

A continuación, se presentan las entidades recomendadas para los sistemas presentes mencionados en esta metodología:

- ACI: American Concrete Institute
- AGMA: American Gear Manufacturers Association
- HI: Hydraulic Institute
- AISC: American Institute of Steel Construction
- ANSI: American National Standards Institute
- ASME: American Society of Mechanical Engineers
- ASNT: American Society for Non-Destructive Testing
- ASTM: American Society for Testing and Materials
- AWS: American Welding Society
- AWWA: American Water Works Association
- CMAA: Crane Manufacturers Association of America, Inc.
- DIN: Deutsches Institut für Normung
- FEM: Federation Europeenne de la Manutention
- FM: Factory Mutual
- ICEA: Insulated Cable Engineers Association
- ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas
- IEC: International Electrotechnical Commission
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ISO: International Standardization Organization
- MSG: Manufacture's Standard Gauge for Sheet Steel

- NEC: National Electric Code
- NEMA: National Electrical Manufacturers

No obstante, normas o estándares locales aplicables pueden variar de acuerdo con la ubicación del proyecto.

7.3.4.2 Tuberías

En los criterios de diseño se debe definir específicamente las normas con base en las entidades referenciadas que permitan determinar los materiales y las dimensiones de las tuberías presentes diseñados en la etapa de desarrollo técnico. Cada una de estas normas pueden variar de acuerdo con la entidad, tipo de fluido y requerimientos del cliente.

Las normas aplicables al caso tratado para el desarrollo de esta metodología se tienen las siguientes:

- ANSI B1.20.1 *Standard for Pipe Threads, General Purpose, Inch* (American Society of Mechanical Engineers, 2013)
- ASME B31.1 *Power Piping, ASME Code for Pressure Piping*. (American Society of Mechanical Engineers, 2016)
- ASME B36.19 *Stainless Steel Pipe* (American Society of Mechanical Engineers, 2018)
- ASTM A-53: *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. (International, ASTM, 2022)
- ASTM A-312 *Standard Specification for Seamless, Welded and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless-Steel Pipes* (International, ASTM, 2022)

7.3.4.2.1 Codificación de líneas

Cada uno de los sistemas utilizan tuberías que deben ser clasificadas mediante códigos con el fin de mantener un inventario bien definido, de la misma forma en la que se asignan tags a los equipos principales de los sistemas. En los criterios de diseño se debe definir esta codificación, determinando una estructura que relacione el sistema, el fluido, el área de trabajo, el diámetro, el material y los aislamientos. Cabe aclarar que la estructura de la codificación depende de lo acordado con el cliente o por el sistema de gestión definido en el proyecto.

7.3.4.3 Condiciones de sitio

Para los cálculos a realizar en la etapa de desarrollo técnico se debe definir previamente las condiciones ambientales a las que estarán los sistemas a modernizar. Estas, denominadas también condiciones de sitio, las cuales deben ser definidas en el documento de criterios de diseño incluyendo altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

7.3.4.4 Lenguajes y unidades de medida

Acá se delimita el lenguaje utilizado para redactar los documentos desarrollados durante el proyecto y las unidades de medida utilizadas en los informes y planos a entregar al cliente.

7.3.4.5 Criterios técnicos particulares de los sistemas

Con todos los criterios generales definidos, se procede a precisar los parámetros de diseño de cada uno de los sistemas.

7.3.4.5.1 Pilotaje del sistema de mando

En este apartado se debe especificar los componentes principales con los que contará el sistema como lo son el tanque sumidero, las unidades de bombeo, el tanque de aceite a presión, las válvulas limitadoras de presión, las válvulas direccionales, las tuberías, las válvulas y demás accesorios. De acuerdo con cada uno de estos elementos se debe definir las siguientes características:

- Alcance de la modernización
- Características del aceite del regulador:
 - Presión de trabajo
 - Clasificación del aceite
- Tanque sumidero:
 - Volumen o Dimensiones del tanque
 - Normas o estándares de fabricación
 - Instrumentación de nivel y temperatura en el tanque sumidero
- Sistema de bombeo:
 - Tipos de bombas
 - Potencia mínima de las bombas
 - Tipo de motores para las bombas
 - Válvulas presentes en el sistema de bombeo
 - Filtros de descarga
 - Accesorios
- Tanque de aceite a presión:
 - Presión de trabajo
 - Volumen
 - Límites de presión mínimos y máximos de control del tanque
 - Instrumentación de nivel y de presión presente en el tanque
- Accesorios adicionales requeridos en algún caso en específico.

Cada una de estas características serán vitales para tener el punto de partida del diseño del pilotaje del sistema de mando. Para la modernización de la central hidroeléctrica Guatapé, basados en el numeral 6.1.1, donde se menciona que este sistema tiene como prioridad el funcionamiento del regulador de velocidad de la turbina, para su diseño se tiene de referencia la norma IEC 61362-2012: *Guide to Specification of Hydraulic Turbine Governing Systems*. (British Standards Institution, 2012)

7.3.4.5.2 Sistema By-Pass y drenaje

De la misma manera se debe proceder con el sistema By-Pass y drenaje, donde se definen las siguientes características:

- Alcance de la modernización
- Tuberías:
 - Presión de trabajo

- Material de fabricación
- Válvula de aguja:
 - Accionamiento
 - Materiales de los accesorios
- Válvulas:
 - Accionamiento
 - Accesorios

7.3.4.5.3 Sistema contra chorro

Debido a la similitud que tiene este sistema contra chorro con el sistema By-Pass en cuanto a elementos que los conforman, las características que se definen en los criterios técnicos particulares son las siguientes:

- Alcance de la modernización
- Tuberías:
 - Presión de trabajo
 - Material de fabricación
- Válvula de aguja:
 - Accionamiento
 - Materiales de los accesorios
- Válvulas:
 - Accionamiento
 - Accesorios

Debido a que este sistema es utilizado para reducir el tiempo de parada de la unidad en paros de emergencia, se debe mencionar la duración del tiempo de detención cuando este es activado o en caso de ser modificado, definir el tiempo requerido por el cliente.

7.3.4.5.4 Sistema de mando

Para terminar con los criterios técnicos particulares, se deben definir las siguientes características del sistema de mando:

- Alcance de la modernización
- Tuberías:
 - Presión de trabajo
 - Materiales de fabricación
- Servomotor:
 - Capacidad
 - Dimensiones
 - Carrera
 - Tiempo requerido de apertura y cierre
 - Presión de trabajo
- Válvulas:
 - Accionamiento

De esta forma, ya se cuentan con los parámetros iniciales para el diseño de los sistemas a modernizar y este documento será la guía tanto para el diseñador como para el cliente sobre la orientación del proceso de la etapa de desarrollo técnico a realizar posteriormente.

7.3.5 Consultas a fabricantes e Informe de alternativas

Antes de comenzar con el desarrollo del diseño de los sistemas, es recomendable realizar consultas a proveedores y/o fabricantes nacionales e internacionales con el fin de estar actualizado sobre las tecnologías y soluciones utilizadas actualmente a los problemas presentes en los sistemas implementados en la central hidroeléctrica a modernizar.

Los fabricantes ofrecerán equipos que se diferencien entre ellos para ser implementados en el mismo sistema, por lo que el consultor o la persona encargada de implementar la metodología debe presentarle al cliente un informe de alternativas con el objetivo de definir una ruta o la opción más viable desde las perspectivas económica y técnica para la modernización de los sistemas presentes en las válvulas esféricas o, en caso de llevar a cabo este procedimiento en otros sistemas, presentes en la central hidroeléctrica.

En primer lugar, se debe realizar una investigación de acerca de cuáles fabricantes son los recomendados para cada uno de los sistemas. Esto teniendo en cuenta la experiencia con la que éste cuenta y la participación en proyectos realizados. De igual forma, se recomienda consultar con los fabricantes de los equipos que se van a remplazar en caso de evidenciar que este aún se encuentre operando en dicha área de trabajo.

Cuando se cuente con un grupo selecto de fabricantes que puedan desempeñarse, se debe comenzar por exponer cada una de estas con sus experiencias, años de operación y proyectos de referencia en el informe para contextualizar al cliente sobre ellos. De esta parte depende el respaldo y la confiabilidad de las alternativas que presente, por lo que es de importancia contar con esta información.

Luego de tener definida la información de cada uno de los fabricantes, se procede a realizar una tabla de estado de la consulta con el fin de tener una trazabilidad de esta. En la siguiente tabla se realiza una propuesta para realizar esta actividad.

Tabla 5. Resumen información de los proveedores

Fabricante	Persona de contacto	Correo	Estado de la consulta	Ultima fecha de comunicación

Para cada uno de los sistemas, se recomienda contar con una tabla que permita identificar las alternativas presentes y el estado de las consultas.

A partir de esta información recopilada, se procede a reunir la información enviada sobre los equipos que los fabricantes/proveedores ofrecen, sus características y procedimientos de fabricación utilizados con el fin de definir las ventajas y desventajas que estos presentan en el caso de modernización desarrollado.

Este análisis le permitirá al cliente contar con información examinada y clasificada que le facilite determinar un criterio de decisión de la alternativa. Para soportar este análisis, es recomendable implementar una matriz de selección que, bajo diferentes criterios que deben estar presentes en el sistema a modernizar se realice una valoración de los equipos y obtener una tabla de clasificación de alternativas.

Para realizar esta evaluación de alternativas se recomienda utilizar la metodología de promedios ponderados que, utilizando una estructura algorítmica simple, permite una fácil comprensión del decisor y definir criterios de decisión. Esta metodología es incluso recomendada en la Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales, adoptada en la resolución 1402 de 2018 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2018)

7.4 DESARROLLO TÉCNICO

Con la etapa de estudios previos realizada, ya se cuenta con información completa y concisa sobre los sistemas instalados actuales. Por lo tanto, se procede con el desarrollo de la ingeniería para el dimensionamiento y caracterización de los sistemas modernizados a instalar.

La etapa de desarrollo técnico, al igual que la etapa previamente explicada en el numeral 7.3 es realizada de forma que el resultado obtenido en cada paso es documentación base para la elaboración del siguiente. Como se menciona en el numeral 7.1, la etapa de desarrollo técnico cuenta con los siguientes pasos:

- Memorias de diseño
- Simulación
- Integración 3D
- Elaboración de planos
- Presupuesto
- Especificaciones técnicas

7.4.1 Memoria de diseño

El comienzo de todo desarrollo de ingeniería es por medio de los cálculos para el diseño del sistema y para ello, se debe realizar una memoria donde que reúna todos los procedimientos realizados para cumplir este objetivo en cada uno de los sistemas incluidos en la modernización.

En este documento es donde se hace referencia a todas las normas y estándares nacionales e internacionales utilizados y los cuales fueron mencionados en los criterios de diseño realizados en la etapa anterior.

7.4.1.1 Memoria de cálculo para sistema de pilotaje

Como se ha mencionado en el numeral 5.2.1, el pilotaje para el mando de una válvula esférica se realiza con agua proveniente de la conducción o con aceite suministrado por una unidad hidráulica. Para comenzar con la elaboración de la memoria de cálculo para este sistema, se debe definir el fluido a utilizar en este sistema ya que esto determina los equipos principales para tener en cuenta.

Considerando el ejemplo con el cual se está realizando la explicación de esta metodología y la recomendación de hacer uso de un fluido en buenas condiciones, factor que se encuentra explicado en el numeral 5.2.1.1, se define que para el pilotaje del sistema de mando se continuará realizando con aceite proveniente de una unidad hidráulica, específicamente de aquella encargada del regulador de velocidad. Esto con el fin de

centralizar el sistema de control y operación de todos los equipos principales de las turbinas y, además, contar con un sistema que opere sin preocupaciones por presencia de sedimentos o partículas que afecten los elementos que se encuentren instalados.

Para determinar la cantidad de aceite requerida, presión y caudal se comienza por la definición del actuador para el pilotaje. En la Figura 15 se puede evidenciar la válvula chamber que se encuentra instalada actualmente en la central y actualmente este equipo no es de fabricación estándar.

En caso de querer continuar con este equipo, se debe evaluar su estado tanto de las agujas como del vástago rotativo y realizar reparaciones que puedan llevar una gran cantidad de tiempo donde la unidad se encuentre parada o una dificultad en encontrar los elementos debido al paso de años y desarrollos de nuevas tecnologías.

Para la sustitución de este equipo es importante contar con la información obtenida por los fabricantes en la etapa de estudios previos ya que se encuentran diferentes soluciones utilizando elementos estandarizados que permiten realizar esta función de pilotaje. Dentro de estos se encuentran los actuadores como: servomotores lineales, actuadores yugo escocés o motores hidráulicos. La selección de éste se basa en la propuesta realizada por el fabricante o en la selección del elemento que controle el paso de agua hacia el servomotor.

De acuerdo con lo anterior, la estructura para el dimensionamiento de un sistema de pilotaje parte de la selección de la válvula que controle el flujo hacia el servomotor de la válvula esférica. Este elemento, a pesar de ser parte del sistema de mando y no del pilotaje, permitirá definir el actuador requerido y sus características para realizar su conmutación. Dentro de este dimensionamiento del actuador se deben tener en cuenta el par de apertura de la válvula y los coeficientes de fricción presentes en el rozamiento de los elementos internos al momento de ser operada. Toda esta información debe ser solicitada a un fabricante con el fin de tener contar con un sistema dimensionado bajo referencias del mercado.

Al contar con el actuador dimensionado se puede continuar con el cálculo de los diámetros y características de la tubería requerida para el sistema de pilotaje. Como primeros datos para tener en cuenta para este proceso son el caudal y la presión requerida en el actuador con el fin de garantizar su funcionamiento bajo el tiempo estipulado de operación. Por lo tanto, se recomienda que la velocidad del aceite en las tuberías sea cercana a 1,5 m/s, premisa que permitirá definir el diámetro de la tubería. Con esta característica obtenida se procede a utilizar la norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016) que permitirá definir el espesor requerido de la tubería para la presión de trabajo del sistema y determinar el Schedule de la tubería.

A partir de este resultado se deben seleccionar los tipos de conexiones a tener el sistema. El requerir que la tubería implementada para el sistema de pilotaje deba ser roscada para la conexión de cada uno de los equipos, implica que este Schedule deba ser aumentado para que en estos puntos donde se realice la rosca no se presenten fallas por la presión de operación. En caso de evitar aumentar el Schedule ya sea por costo o por requerimiento del cliente, se pueden implementar accesorios como racores que son unidos a la tubería por presión, cuenta con la rosca requerida y su presión de trabajo es bastante alta. Para estos elementos se cuentan con las normas ISO 8434-1, DIN 2353 y SAE J514.

Continuando con la selección de accesorios, para el sistema de pilotaje se deben calcular la caída de presión total incluyendo los equipos como filtros, válvulas y accesorios, con el fin de seleccionar una unidad hidráulica que cumpla con las características del sistema y pueda vencer dicha caída de presión.

De igual importancia, las ubicaciones del actuador y de la unidad hidráulica permitirán definir un trazado de tuberías el cual se debe considerar para determinar el volumen de aceite requerido. Como se mencionó en el numeral 7.3.4.5.1, la norma internacional IEC 61362-2012: *Guide to Specification of Hydraulic Turbine Governing Systems* permite realizar el dimensionamiento de este equipo. Comenzando por el tanque sumidero, se debe remitir al numeral 5.12.2.6 *Oil sump Tanks* de esta norma, donde se indica que el tanque sumidero de aceite debe ser diseñado para contener todo el aceite del sistema en caso de ser drenado y además ser diseñado con posibilidad de un completo vaciado para propósitos de mantenimiento. Esto indica que los volúmenes de aceite requeridos en cada uno de los equipos a los que se les debe suministrar aceite y además todo el volumen conformado en cada uno de los tramos que llevan este fluido a dichos equipos debe ser considerado para el dimensionamiento del tanque de la unidad. Adicionalmente, como recomendación de buenas prácticas se debe considerar un factor de diseño que garantice una cantidad de aceite adicional en caso de presentar alguna pérdida de fluido durante la operación y por seguridad en el dimensionamiento de este volumen. Este factor puede ser entre 1.2 y 1.3, considerando un aumento de volumen entre el 20% y 30%. De igual forma, la norma DIN 19704, numeral 10.1.6 *Hydraulic station* indica que los tanques sumideros deben ser diseñados que forma que pueda almacenar cuatro (4) veces el volumen máximo de aceite suministrado en un minuto, el volumen de todos los cilindros conectados y el volumen de toda la tubería del sistema.

De esta manera, ya se cuenta con un sistema caracterizado y dimensionado para el pilotaje del sistema de mando. En resumen, la estructura a seguir para ello es la siguiente:

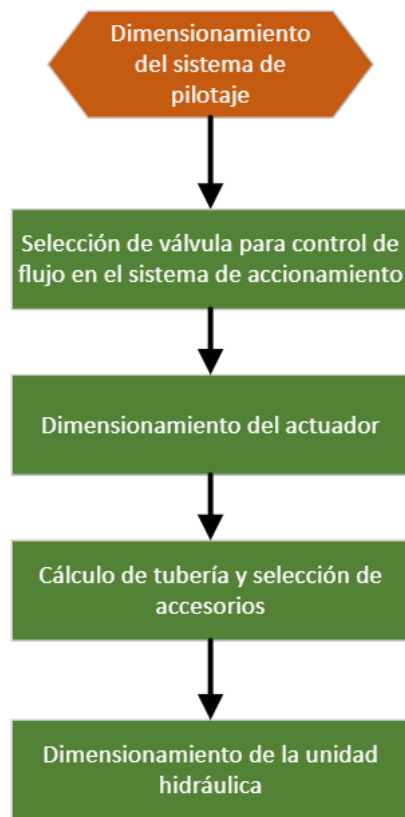


Figura 27. Estructura dimensionamiento sistema de pilotaje

7.4.1.1.1 Caso de aplicación memoria de cálculo sistema de pilotaje

Como se mencionó en el numeral anterior, la variedad de alternativas de pilotaje actuales es bastante alta. Debido a esto, para la explicación de este documento se propone el siguiente sistema de pilotaje para el mando de la válvula esférica.

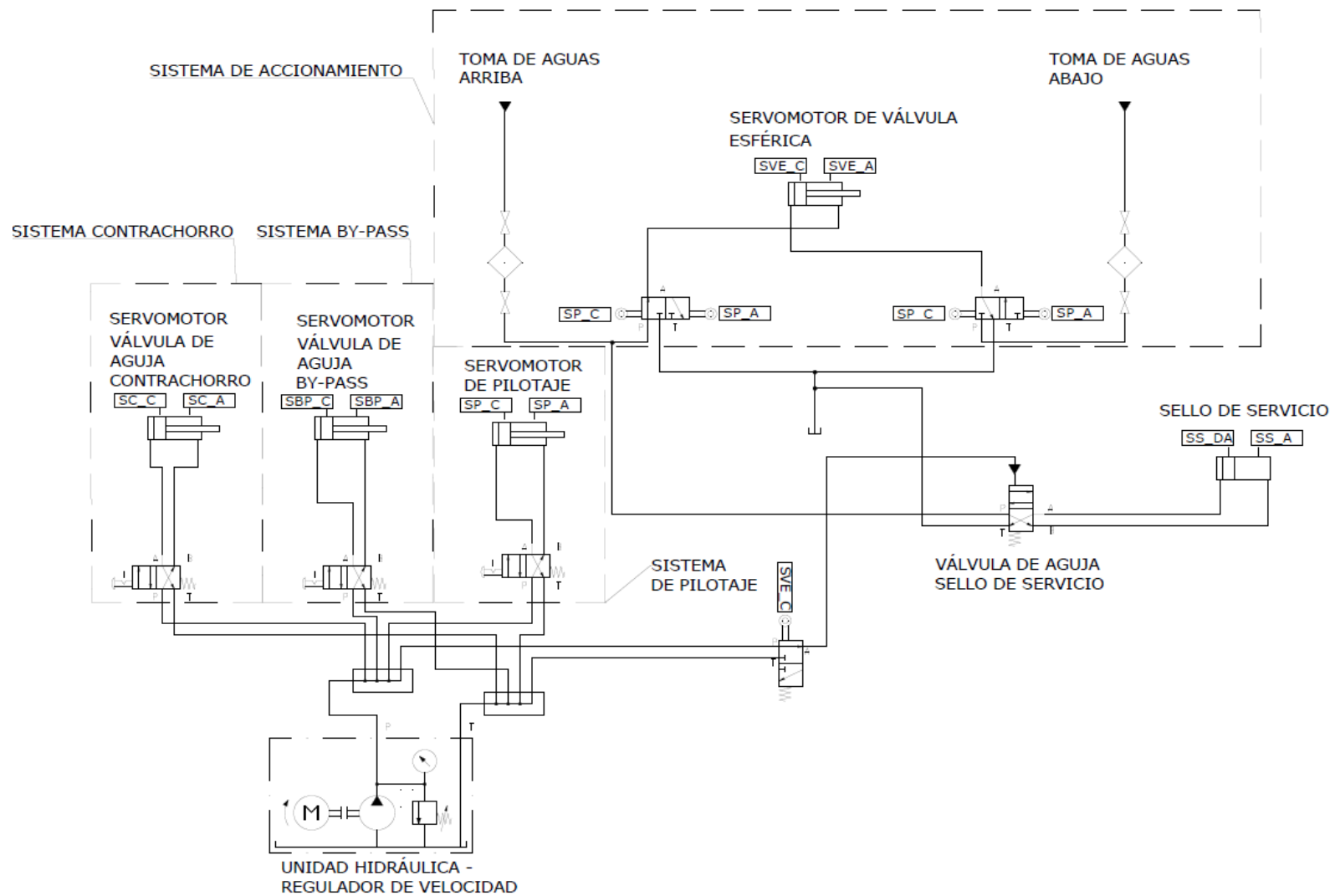


Figura 28. Esquema sistema de pilotaje para apertura y cierre de válvula esférica

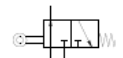
LEYENDA			
EQUIPOS		CONEXIONES / SEÑALES	
	TOMAS DE AGUA DE LA CONDUCCIÓN	SS_DA	SELLO DE SERVICIO DESAPLICADO
	VÁLVULA MANUALES PARA MANTENIMIENTO	SS_A	SELLO DE SERVICIO APLICADO
	FILTROS DE ALTA PRESIÓN PARA AGUA	SP_C	SERVOMOTOR DE PILOTAJE CERRADO
	DRENAJES	SP_A	SERVOMOTOR DE PILOTAJE ABIERTO
	VÁLVULA DE 3 VÍAS CON ACCIONAMIENTO MANUAL	SBP_C	SERVOMOTOR DE VÁLVULA DE AGUJA DE BY-PASS CERRADO
	VÁLVULA DE AGUJA PARA ACCIONAMIENTO DE SELLO DE SERVICIO	SBP_A	SERVOMOTOR DE VÁLVULA DE AGUJA DE BY-PASS ABIERTO
	VÁLVULA DE 3 VÍAS CON ACCIONAMIENTO POR RODILLO	SC_C	SERVOMOTOR DE VÁLVULA DE AGUJA DE CONTRACHORRO CERRADO
	VÁLVULA DE 4 VÍAS CON ACCIONAMIENTO CON PULSADOR	SC_A	SERVOMOTOR DE VÁLVULA DE AGUJA DE CONTRACHORRO ABIERTO
	SERVOMOTOR DE DOBLE ACCIONAMIENTO	SVE_C	SERVOMOTOR DE VÁLVULA ESFÉRICA CERRADO
	SELLO DE SERVICIO DE LA VÁLVULA ESFÉRICA	SVE_A	SERVOMOTOR DE VÁLVULA ESFÉRICA ABIERTO
	UNIDAD HIDRÁULICA - REGULADOR DE VELOCIDAD		

Figura 29. Leyenda esquema de sistema de pilotaje

Como se puede evidenciar en la Figura 29, se seleccionaron válvulas de 3 vías y dos posiciones (válvulas 3/2) con accionamiento manual con palanca, las cuales están conectadas por un pivote con el servomotor de doble accionamiento el cual realizar su conmutación. De esta manera se puede identificar este servomotor como el actuador y comenzar con el dimensionamiento del sistema de pilotaje.

Como primera referencia se tiene el catálogo de válvulas de bola multidireccional del fabricante Stauff. En este se puede encontrar la válvula tipo CBVSL-3 (STAUFF, 2022), la cual cuenta con la configuración requerida para el esquema presentado.

High-Pressure Block Body Ball Valve ▪ Type CBVSL-3

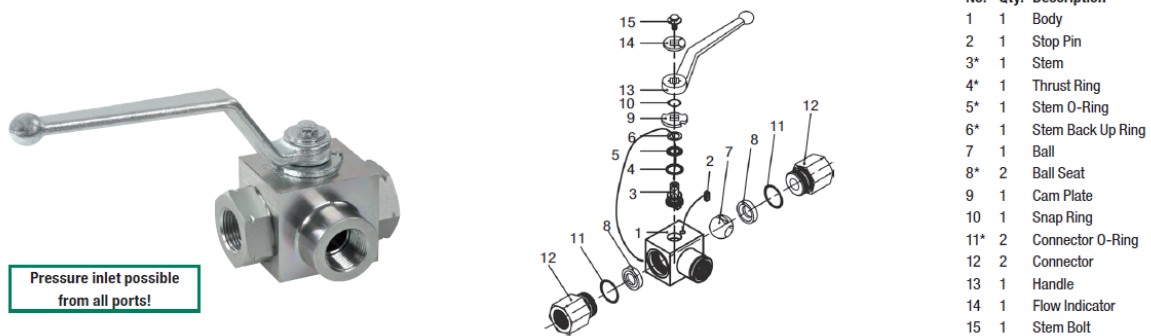


Figura 30. Válvula de bola multidireccional CBVSL-3 Stauff.
Tomado de (STAUFF, 2022)

Para realizar una selección correcta de estas válvulas, se debe tener como base los datos presentados en la Tabla 2, donde se menciona que el servomotor de accionamiento de la válvula esférica cuenta con un volumen de 110 litros y debe ser accionado en un tiempo ajustable de 90 a 150 segundos. Estos datos son de suma importancia debido a que son aquellos que se deben garantizar con el sistema modernizado a instalar.

En primer lugar, se debe determinar el caudal requerido para el servomotor, obtenido con la Ecuación 1

Ecuación 1. Caudal requerido para servomotor de válvula esférica

$$Q_s = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} = \frac{110 \text{ litros}}{90 \text{ segundos}} = 1,22 \frac{l}{s} \approx 0,00122 \frac{m^3}{s}$$

De acuerdo con ese caudal se debe seleccionar un diámetro el cual garantice la velocidad del agua entre 1 y 1,5 m/s. Por lo tanto, el área interna de la tubería se obtiene de la Ecuación 2

Ecuación 2. Área interna requerida en la tubería de agua

$$A_{\text{interna}} = \frac{Q_s}{v} = \frac{0,00122}{1,5} = 8,13 \times 10^{-4} m^2$$

Ecuación 3. Diámetro interno de la tubería de agua

$$D_{\text{interno}} = \sqrt{\frac{4 * A_{\text{interna}}}{\pi}} = 0,032 m \approx 32,18 mm$$

Como se puede apreciar en la Ecuación 3 se obtuvo el diámetro de la tubería despejando dicha variable de la ecuación del área de un círculo.

De acuerdo con la norma ASME B36.10 (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y ASME B36.19 (American Society of Mechanical Engineers, 2018) se determina que el diámetro recomendado comercial para esta aplicación es de 1-1/4 in para garantizar el diámetro interno y por consiguiente la velocidad del fluido.

Con base en esta medida, la válvula multidireccional seleccionada debe contar con esta medida. Por lo tanto, las dimensiones de este elemento se encuentran en la Figura 31

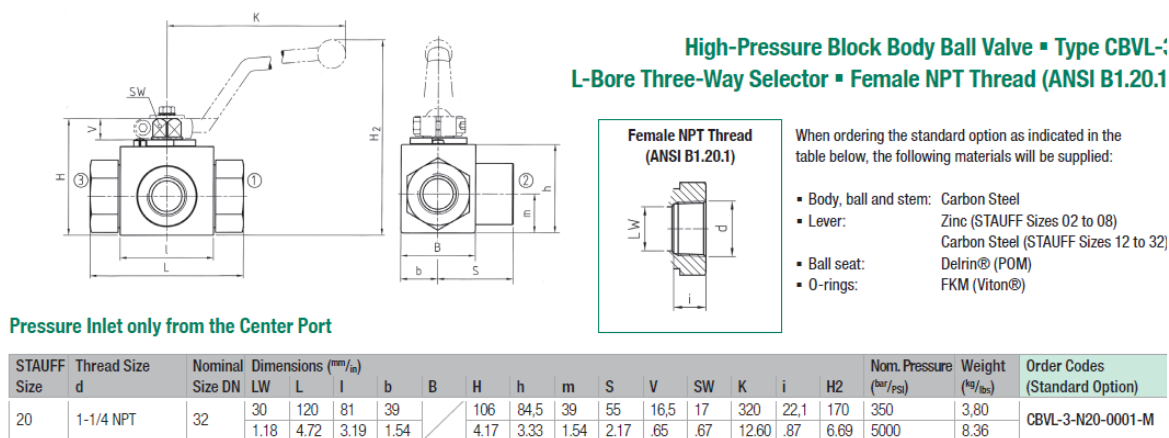


Figura 31. Dimensiones válvula multidireccional Stauff.
Tomado de (STAUFF, 2022)

Para continuar con el dimensionamiento del sistema de pilotaje, se debe tener en cuenta la medida K en la Figura 31 que hace referencia al brazo para el accionamiento de este elemento. De igual forma, en este catálogo de referencia se encuentra, en el apéndice técnico, las gráficas de torque requerido para el accionamiento con base en la presión de trabajo del sistema.

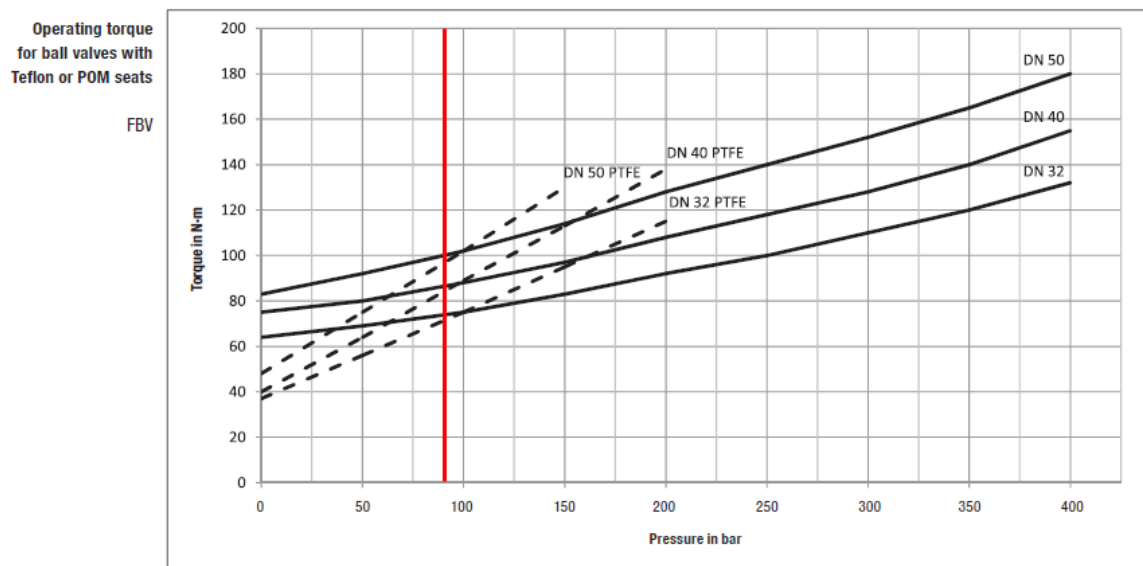


Figura 32. Torque requerido para accionamiento de válvula multidireccional Stauff.
Tomado de (STAUFF, 2022)

En la Figura 32 se encuentra, representada con una línea roja vertical, la presión de trabajo del sistema de accionamiento la cual está en 81 Bar. La válvula seleccionada tiene un diámetro nominal (DN) de 32, por lo que el cruce entre estas dos líneas indica que el torque requerido de apertura es de alrededor de 70 Nm. Es por recomendación del fabricante contar con un factor de seguridad de 2 cuando el fluido que pasa por la válvula es no engrasado como lo es el agua, por lo que el torque admisible debe ser de 140 Nm. El brazo

de accionamiento de la válvula seleccionada es de 0,32 m, por lo que la fuerza requerida para la apertura y cierre se determina por la Ecuación 4.

Ecuación 4. Fuerza requerida accionamiento válvula multidireccional

$$F_{requerida} = \frac{T}{K} = \frac{140}{0,32} = 437,5 \text{ N}$$

Considerando que el servomotor hidráulico debe realizar el movimiento de dos válvulas multidireccionales, se define que la fuerza requerida debe ser el doble que la determinada en la Ecuación 4. Por lo tanto, la fuerza de accionamiento total es de 875 N.

Otro factor para tener en cuenta es la posición del servomotor hidráulico con respecto a la válvula multidireccional. Se hace referencia al ángulo de incidencia de la fuerza del cilindro en la palanca de accionamiento. Para este caso se contará con que el ángulo es de 45°. De esta forma, la fuerza del servomotor es determinada en la

Ecuación 5. Fuerza requerida del cilindro hidráulico – Sistema de pilotaje

$$F_{cilindro} = \frac{F_{requerida}}{\cos \alpha} = \frac{875}{\cos(45^\circ)} = 1237,44 \text{ N}$$

Considerando que, acorde al catálogo del fabricante Stauff, el accionamiento de esta válvula es de 90°, la carrera del servomotor se puede calcular con base en la medida del brazo utilizando el teorema de Pitágoras:

Ecuación 6. Teorema de Pitágoras

$$a^2 = b^2 + c^2$$

Ecuación 7. Carrera del servomotor hidráulico

$$C_{servomotor} = \sqrt{2 * K^2} = \sqrt{2 * 0,32^2} = 0,45 \text{ m} \approx 452,5 \text{ mm}$$

Resumiendo, las siguientes tablas se muestran los datos definidos hasta el momento con respecto al sistema de pilotaje.

Tabla 6. Condiciones de operación válvula esférica – Dimensionamiento sistema de pilotaje

CONDICIONES DE OPERACIÓN VÁLVULA ESFÉRICA		
Condición	Valor	Unidad
Volumen del servomotor toroidal	110	l
Tiempo de accionamiento	90	s
Caudal	1,22	l/s
Presión de trabajo	87	Bar

Tabla 7. Selección válvula multidireccional – Sistema de accionamiento

SELECCIÓN DE VÁLVULA MULTIDIRECCIONAL MANUAL [1]		
Condición	Valor	Unidad
Diámetro de la tubería actual	1 1/4	in
Schedule de la tubería	SCH 40	
Diámetro interno	35,08	mm
Velocidad del agua	1,26	m/s

SELECCIÓN DE VÁLVULA MULTIDIRECCIONAL MANUAL [1]		
Dimensiones de la válvula		
Dimensión	Valor	Unidad
Diámetro	1 1/4	in
Brazo de accionamiento	0,32	m
Torque requerido para accionamiento	70	Nm
Factor de seguridad	2	
Torque admisible	140	Nm

NOTAS:

1. Válvula de referencia: Válvula multidireccional Stauff Tipo CBVL-3 Female NPT Thread

Tabla 8. Dimensionamiento de cilindro hidráulico para pilotaje

DIMENSIONAMIENTO DEL CILINDRO HIDRÁULICO PARA PILOTAJE		
Dimensión	Valor	Unidad
Fuerza requerida	437,5	N
Angulo del servomotor	45	°
Coeficiente del ángulo	0,707106781	
Fuerza admisible requerida	1237,44	N
Carrera del cilindro	0,45	m

Continuando con el dimensionamiento del sistema, se deben consultar catálogos de fabricantes de cilindros hidráulicos como Parker o Rexroth, para determinar un servomotor que cumpla con esta aplicación. En este caso, se ha seleccionado un servomotor de doble accionamiento con un pistón de 2 pulgadas y un vástago de 1 pulgadas, siendo estas de las medidas más bajas con respecto a los cilindros Series 2H de Parker (Parker, 2015).

Con estas dimensiones, se puede obtener las presiones requeridas para que el servomotor ejerza la fuerza definida para la apertura con la Ecuación 8.

Ecuación 8. Presión de apertura para cilindro hidráulico – Sistema de pilotaje

$$P_{apertura} = \frac{F_{cilindro}}{A_{piston}} = \frac{1237,44}{\left(\frac{\pi * \left(\frac{50}{1000} \right)^2}{4} \right)} = 630221,42 \text{ Pa} \approx 0,63 \text{ MPa}$$

En el caso de presión de cierre se debe considerar que el área a la cual el aceite realiza la presión para el movimiento del pistón es menor debido a que se encuentra el vástago. En la Ecuación 9 se muestra cómo se realiza el cálculo de este valor.

Ecuación 9. Presión de cierre para cilindro hidráulico – Sistema de pilotaje

$$P_{cierre} = \frac{F_{cilindro}}{A_{piston} - A_{vástago}} = \frac{1237,44}{\left(\frac{\pi * \left(\frac{50}{1000}\right)^2}{4}\right) - \left(\frac{\pi * \left(\frac{25}{1000}\right)^2}{4}\right)} = 840295,23 \text{ Pa}$$

$$P_{cierre} \approx 0,84 \text{ MPa}$$

Como se puede ver en la Tabla 1, la presión de operación de la unidad hidráulica cumple con lo requerido para el accionamiento de este sistema de pilotaje dimensionado.

Acorde a la estructura planteada en la Figura 27, se continua con el dimensionamiento de la tubería y la selección de los accesorios.

Comenzando por el dimensionamiento de la tubería, se debe determinar el diámetro que garantice una velocidad adecuada del aceite alrededor de 1,5 m/s. Para ello se determina en un principio el volumen de aceite en la cámara del servomotor y se define el tiempo de accionamiento de este.

Ecuación 10. Volumen del servomotor hidráulico

$$V_{cilindro} = A_{piston} * C_{servomotor} = \left(\frac{\pi * \left(\frac{50}{1000}\right)^2}{4}\right) * 0,42 = 8,24 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

En la Ecuación 10 se determinó el volumen del servomotor con la cámara de apertura ya que esta cuenta con un mayor espacio en comparación a la de cierre. Definiendo para este caso que el servomotor debe ser accionamiento en 3 segundos, el caudal requerido para ello se define por la Ecuación 11.

Ecuación 11. Caudal para accionamiento del servomotor de pilotaje

$$Q_{servomotor} = \frac{V_{cilindro}}{t_{accionamiento}} = \frac{8,24 \times 10^{-4}}{3} = 2,75 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con este caudal y la velocidad recomendada del aceite, se realiza un procedimiento similar hecho con la Ecuación 2 y Ecuación 3, en este caso para el sistema de pilotaje.

Ecuación 12. Área interna tubería de aceite – Sistema de pilotaje

$$A_{i-servomotor} = \frac{Q_{servomotor}}{v} = \frac{2,75 \times 10^{-4}}{1,5} = 1,83 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$D_{interno} = \sqrt{\frac{4 * A_{i-servomotor}}{\pi}} = 0,015 \text{ m} \approx 15,27 \text{ mm}$$

Con este diámetro y las normas ASME B36.10 y ASME B36.19 se define que un diámetro comercial apropiado para este sistema de pilotaje es de ½ pulgada. Para determinar el Schedule de esta tubería se remite a la norma ASME B31.1 – Power Piping (American Society of Mechanical Engineers, 2016) donde en el numeral 104.1.1 *Straight Pipe Under Internal Pressure*, se explica el procedimiento a realizar para determinar el espesor requerido de la tubería para la presión de trabajo a la que sea sometida.

Ecuación 13. Espesor mínimo ASME B31.1 – Power Piping

$$t_m = \left(\left(\frac{P * D_o}{2 * (S * E + P * y)} \right) + A \right) * (1 + t_f)$$

En la Tabla 9 se muestra la descripción de cada una de las variables presentes en el Ecuación 13 y su valor.

Tabla 9. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema de pilotaje

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
P	Presión interna de diseño	Presión de trabajo del sistema ¹ .	4628	kPa
Do	Diámetro exterior de la tubería	Normas ASME B36.10 y ASME B36.19 ² .	21,3	mm
S	Esfuerzo admisible máximo del material	Esfuerzo admisible del acero inoxidable 316L. Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ³	115142,5	kPa
E	Eficiencia de la junta	Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ³	1	
y	Coeficiente de temperatura de diseño	Valor tomado de la tabla 104.1.2, norma ASME B31.1 Aceros austeníticos con temperatura de trabajo menor a 482°C ³	0,4	
tf	Tolerancia de fabricación	Se le suma un 12,5% al espesor por procedimientos de fabricación ⁴	12,5	%

Haciendo uso de las variables de la Tabla 9 y la Ecuación 13, se obtiene el siguiente espesor mínimo:

$$t_m = 0,474 \text{ mm}$$

¹ Presión máxima de operación de la unidad hidráulica, considerando un factor de sobrepresión de 1,21. Ver Tabla 1.

² Referencias: (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

³ Referencia: (American Society of Mechanical Engineers, 2016)

⁴ Referencias: ASTM A53 Par 12.2 (International, ASTM, 2022) y ASME A106 Par 18.2 (International, ASTM, 2019)

Para estos sistemas es comúnmente utilizando el tubo. Este, a diferencia de la tubería, es denominado por la medida de su diámetro exterior y no por un diámetro nominal. Con el resultado que se obtuvo del cálculo del espesor, es aplicable un tubo de 22 mm de diámetro exterior con un espesor de 0,5 mm, esto acorde con la norma EN 10305-1 (British Standard Institution, 2016).

En caso de utilizar accesorios como codos, tees y conexiones, se debe considerar el espesor perdido por la rosca en la tubería basado en el estándar de la rosca seleccionada. En estos casos, el Schedule de la tubería es aumentado que permita una mayor confiabilidad de la tubería para no fallar por la presión de trabajo. Una solución donde no se debe roscar la tubería es seleccionar racores con la rosca requerida. Estos se encuentran tanto en normas europeas como en normas americanas, como son las siguientes:

- ISO 8434-1: *Metallic Tube connections for fluid power and general use*
- DIN 2353: *Non-soldering Compression fittings with cutting ring*
- SAE J514: *Hydraulic Tube Fittings*

Para la selección de estos elementos se cuenta con el diámetro y la presión de trabajo del sistema.

Con las tuberías y los accesorios seleccionados, se finaliza con el dimensionamiento de la unidad hidráulica. Comenzando por la validación del volumen del tanque sumidero se remite a la norma DIN19704-1 (International Organization for Standardization, 1998) en el numeral 10.1.6 Estación hidráulica donde especifica que el volumen del tanque debe ser como mínimo cuatro (4) veces el caudal en un (1) minuto de las bombas, el volumen de las tuberías llenas de aceite y el volumen del cilindro de accionamiento que esté conectado. En la siguiente tabla se muestran los elementos previamente mencionados.

Tabla 10. Validación volumen de tanque sumidero – DIN 19704

Equipo	Volumen / Caudal	Unidad
Caudal de la bomba	82	l/min
Volumen del deflector [1]	31	l
Volumen del inyector [1]	12	l
Volumen del acumulador	440	l
Volumen muerto	440	l
Volumen del sistema de pilotaje [2]	2	l
Volumen válvula de aguja sistema contrachorro [3]	2,20	l
Volumen válvula de aguja sistema By-Pass [4]	2,19	l
Volumen total de la tubería [5]	110	l
Factor de seguridad	2	
Volumen mínimo del tanque	2734,77	l

NOTAS:

1. El volumen de este equipo es asumido ya que no se encuentra dentro del alcance definido del trabajo realizado.
2. Volumen tomado de la Ecuación 10, con factor de seguridad de 2. La tubería de este sistema se encuentra incluida en el volumen total de tubería.
3. Volumen de aceite ajustable. Este depende del desarrollo de optimización del sistema contrachorro. Ver Tabla 24 en el numeral 7.4.1.3.1.
4. Volumen de aceite ajustable. Este depende del desarrollo de optimización del sistema By-Pass. Ver Tabla 15 en el numeral 7.4.1.2.1.
5. El volumen de la tubería es asumido, depende de las dimensiones, la longitud de la tubería y la cantidad de equipos a la que la unidad suministre aceite.

Como se puede ver en la Tabla 10, el volumen mínimo requerido del tanque sumidero es de 2750 litros y revisando el dato del volumen actual del tanque tomado de la Tabla 1, se cuenta actualmente con 4500 litros por lo que con el valor especificado se cuenta con un margen de seguridad adecuado.

De igual manera, se debe validar la potencia hidráulica de las bombas presentes según el requerimiento de las bombas. Para ello se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Potencia requerida de la bomba hidráulica

$$P_{requerida} = \frac{(P_{nominal} + \Delta P) * Q}{eff\%}$$

Donde,

Tabla 11. Variables para potencia requerida de la bomba.

Variable	Descripción	Valor	Unidad
P _{nominal}	Presión nominal del sistema ⁵	0,84	MPa
ΔP	Sumatoria de pérdidas totales ⁶	0,15	MPa
Q	Caudal requerido ⁷	2,75x10 ⁻⁴	m/s
Eff%	Eficiencia de la bomba	0,8	
Prequerida	Potencia requerida de la bomba	0,37	kW

Como se puede ver en la Tabla 1, la potencia de las bombas es suficiente para suministrar aceite al sistema de pilotaje optimizado.

Para determinar el volumen requerido en el tanque acumulador se remite a la norma BS EN 61362-2012 *Guide to specification of hydraulic turbine governing systems*, numeral 5.12.2.1 *Pressure tank (air/oil accumulator)*. En este apartado, se especifica el rango de presión de operación del tanque y el volumen recomendado de uso para este, ya sea con

⁵Presión tomada de la Ecuación 9.

⁶Sumatoria de perdidas mayores y menores asumidas de acuerdo con la distribución del sistema. Para este caso se tomó una longitud de 16 metros y una diferencia de altura de 5 metros.

⁷Caudal tomado de la Ecuación 11

un solo sistema a suministrar como a múltiples. Las siguientes ecuaciones son tomadas de dicha norma:

Ecuación 15. Rango de presión operativa tanque acumulador a presión

$$P_{operativa\ max} = (0,85 \sim 1,00) * P_{diseño}$$

$$P_{operativa\ min} = (0,80 \sim 0,9) * P_{diseño}$$

Ecuación 16. Volumen útil de tanque acumulador (un solo sistema)

$$V_{util} = 3 * V_s$$

Ecuación 17. Volumen útil de tanque acumulador (múltiples sistemas)

$$V_{util} = 3 * V_{sga} + (1,5 \sim 2,0) * V_{sru}$$

Donde,

Vs: Volumen total de todos los servomotores del sistema.

Vsga: Volumen de aceite servomotores deflectores.

Vsru: Volumen de aceite de los inyectores.

Como se puede ver, el sistema prioritario de la unidad hidráulica es el regulador de velocidad por lo que el dimensionamiento del tanque acumulador de aceite es considerado con los datos de este sistema. Adicionalmente, evidenciado en la Ecuación 10, el volumen de aceite para el servomotor de pilotaje no es considerablemente grande. De igual forma, en caso de utilizar una unidad hidráulica únicamente para el sistema de pilotaje, se debe utilizar la Ecuación 16.

$$V_{util} = 3 * V_s = 3 * 0,82 = 2,46\ litros$$

Los tanques acumuladores permitirán que el sistema se encuentre a una presión constante, permitiendo a las bombas trabajar en intermitencia garantizando la operación bajo un rango de presión dado por la Ecuación 15. Cuando el sistema se encuentre en su presión mínima, las bombas serán encendidas hasta alcanzar la presión máxima y operar el sistema mediante el aceite almacenado en los acumuladores

De esta manera, ya se cuenta con los equipos para el sistema de pilotaje dimensionados. En la Tabla 12 se encuentra un resumen de los valores obtenidos.

Tabla 12. Resultados sistema de pilotaje optimizado

Característica	Valor	Unidad
Diámetro del pistón del servomotor hidráulico	50	mm
Diámetro del vástago del servomotor hidráulico	25	mm
Diámetro de tubería para sistema de pilotaje	1/2	in
Material seleccionado para tubería	Acero inoxidable 316L SCH 10s	

En la Tabla 13 se muestra una comparación de las características requeridas para el sistema de pilotaje dimensionado en este numeral con las características actuales de la unidad hidráulica descritas en el numeral 6.1.1.

Tabla 13. Comparativa resultados Sistema de pilotaje – Sistema unidad hidráulica actual

Característica	Valor requerido sistema de pilotaje	Valor actual unidad hidráulica (ver Tabla 1)	Unidad
Presión de diseño del sistema requerido	0,84	3,82	MPa
Potencia requerida de la bomba para el sistema de pilotaje	0,37	8,6	kW
Volumen mínimo requerido del tanque sumidero	2746,38	4500	l
Volumen mínimo del tanque acumulador para sistema de pilotaje	2,5	440	l

7.4.1.2 Memoria de cálculo para sistema By-Pass y drenajes

Los análisis que se deben realizar para la optimización del sistema By-Pass y drenajes requieren en primer lugar identificar los componentes que lo conforman, siendo estos los siguientes:

- Válvulas manuales para mantenimiento
- Válvula de accionamiento sistema By-Pass (de aguja)
- Tubería

Al contar con menos equipos en comparación al sistema de pilotaje, la estructura para un desarrollo de una memoria de diseño se simplifica, teniendo en cuenta la siguiente estructura:

- Dimensionamiento de tubería y cálculo de espesores de tubería
- Selección de válvula de accionamiento
- Selección de válvulas de mantenimiento.
- Selección de bridas y conexiones.

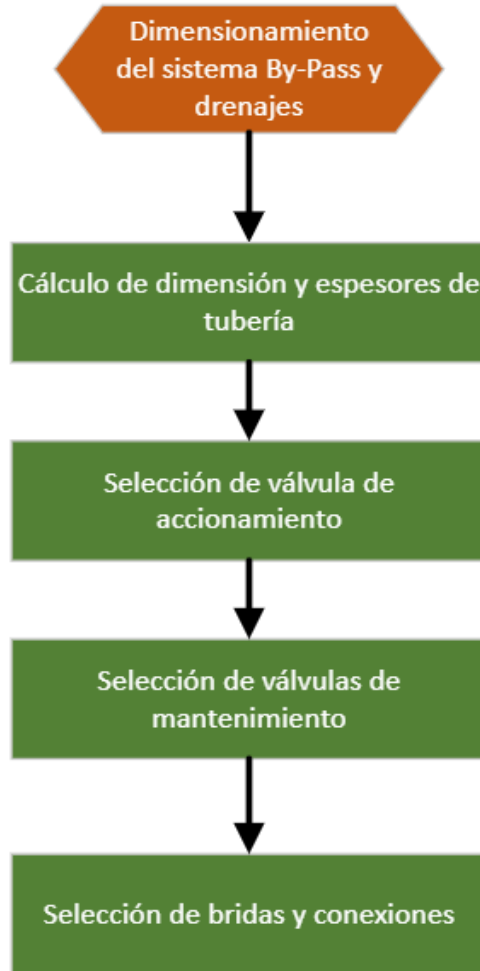


Figura 33. Estructura dimensionamiento Sistema By-Pass

Comenzando por el dimensionamiento de la tubería, se debe realizar un proceso similar al sistema de pilotaje, donde la norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016), garantizando en esta tubería una velocidad del agua de 1,5 m/s.

Considerando los años de operación de las centrales analizadas en la Figura 1, hay una alta probabilidad de que este sistema este compuesto por tuberías, válvulas y accesorios fabricados en aceros al carbono, inclusive algunos donde sus normas de fabricación ya son obsoletas. Por esta razón, tal como se ve en el numeral 7.4.1.1.1, se debe realizar este cálculo de espesores con el fin de actualizar estos elementos acordes a las normas vigentes para diferentes tipos de materiales adecuados para tuberías. Cabe resaltar igualmente las implicaciones de la selección del material de esta tubería, no solo por el dimensionamiento y Schedule que se determine, como también los elementos adicionales que se requieran como lo pueden ser kits de aislamiento entre la válvula esférica y la tubería en caso de seleccionar acero inoxidable como su material de fabricación para evitar el fenómeno de par galvánico entre estos elementos.

Continuando con la estructura se procede a analizar el equipo que permite el accionamiento del sistema By-Pass. Generalmente este equipo es una válvula de aguja de accionamiento por medio de dos cámaras donde entra un fluido, ya sea agua o aceite, similar al funcionamiento de un servomotor. La primera consideración es continuar con el diámetro establecido en el sistema actual, ya que las dimensiones del By-Pass están dadas por las características de la válvula esférica. De acuerdo con esto, se debe especificar las normas de fabricación vigentes para la fabricación de estas válvulas, estándares de bridas y pruebas de presión, procedimientos y criterios de aceptación. Lo mencionado hasta el momento indica que no se realizan cálculos propiamente a la válvula, pero la especificación de estas normas es de suma importancia para la eficiencia y la compatibilidad de los elementos que conforman el By-Pass. Caso similar ocurre con las válvulas de mantenimiento, pues estas deben ser acordes a los estándares actuales. Se debe verificar, al momento de seleccionar válvulas de mantenimiento y válvulas de accionamiento, las conexiones con las que cuente la válvula esférica ya que, para no realizar modificaciones en la conducción o en el cuerpo de la válvula, se deben considerar las dimensiones especificadas por la norma vigente en la época cuando se fabricaron los equipos inicialmente. Esto debido a que, durante las épocas de apogeo de construcción de centrales hidroeléctricas (ver numeral 4.1), generalmente los equipos eran importados lo cual indica que sus estándares de fabricación eran acordes a normas europeas, y actualmente, en Colombia, los equipos con normas americanas son adquiridos con mayor facilidad. Igualmente, se puede presentar que, con los avances en ingeniería realizados, las normas han sido reemplazadas y actualizadas.

En resumen, para la selección de la válvula de accionamiento y las de mantenimiento se deben definir las normas con respecto las siguientes características:

- Norma de fabricación
- Norma de bridas
- Norma de avance de las bridas

7.4.1.2.1 Caso de aplicación memoria de diseño Sistema By-Pass

Considerando la estructura planteada en la Figura 33, se deben verificar las dimensiones de la tubería de acuerdo con el material a utilizar, que en este caso será el acero inoxidable 316L. De acuerdo con las características del sistema descritas en el numeral 6.1.2 y utilizando la norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016) para determinar el espesor mínimo requerido para las condiciones de operación se tiene los siguientes valores:

Tabla 14. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema By-Pass

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
P	Presión interna de diseño	Presión de trabajo del sistema. ⁸	9611	kPa
Do	Diámetro exterior de la tubería	Normas ASME B36.10 y ASME B36.19. ⁹	114,3	mm

⁸ Salto neto de la central de 810 metros (ver numeral 4.1) teniendo en cuenta un factor de sobrepresión de 1,21.

⁹ Referencias: (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
S	Esfuerzo admisible máximo del material	Esfuerzo admisible del acero inoxidable 316L. Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ¹⁰	115142,4	kPa
E	Eficiencia de la junta	Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ¹⁰	1	
y	Coeficiente de temperatura de diseño	Valor tomado de la tabla 104.1.2, norma ASME B31.1 Aceros austeníticos con temperatura de trabajo menor a 482°C. ¹⁰	0,4	
tf	Tolerancia de fabricación	Se le suma un 12,5% al espesor por procedimientos de fabricación. ¹¹	12,5	%
A	Espesor adicional	Espesor adicional por corrosión.	1,5	mm

Con las variables de la Tabla 14, se puede determinar el espesor mínimo con el que debe contar la tubería para las condiciones de diseño de la central hidroeléctrica, de acuerdo con la Ecuación 13.

$$t_m = \left(\left(\frac{P * D_o}{2 * (S * E + P * y)} \right) + A \right) * (1 + t_f)$$

$$t_m = 6,88 \text{ mm}$$

Con este resultado se determina que para el sistema By-Pass se requiere una tubería DN100 con un Schedule 80. Con base en la norma ASME B36.19 (American Society of Mechanical Engineers, 2018), el espesor de la tubería con estas características es de 8,56 mm.

Para la válvula de accionamiento, se especifica que se debe continuar con el diámetro nominal con el que cuenta DN100 y su presión nominal de PN100. Igualmente se debe continuar con su accionamiento por medio de aceite de la unidad del regulador de velocidad. Este accionamiento, al ser realizado con aceite del regulador se debe tener en cuenta el

¹⁰ Referencias: ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016), (International, ASTM A312 - Standard Specification for Seamless, Welded and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless-Steel Pipes, 2022) y (International, ASTM A358 - Standard Specification for Electric-Fusion-Welded Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steel Pipe for High-Temperature Service and General Applications, 2019).

¹¹ Referencias: ASTM A53 Par 12.2 (International, ASTM A53 - Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless, 2022) y ASME A106 Par 18.2 (International, ASTM A106 - Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, 2019)

volumen requerido ya que este hace parte del dimensionamiento del tanque de la unidad hidráulica como se puede ver en la Tabla 10. Para este caso, el volumen es obtenido de los planos de la válvula de aguja, el cual es 3,44 litros. En caso de contar con alguna variación con la válvula presente en el sistema modernizado, debe ser incluido este dato en la validación del tanque sumidero de la unidad hidráulica del regulador.

En la Figura 34, se muestra un esquema de la válvula de aguja instalada actualmente. Cabe aclarar que este dibujo fue realizado con base en el plano original de la válvula fabricada por Neyrpic y no representa en su totalidad al equipo del sistema By-Pass, únicamente se realizó con fines educativos para la explicación de esta metodología.

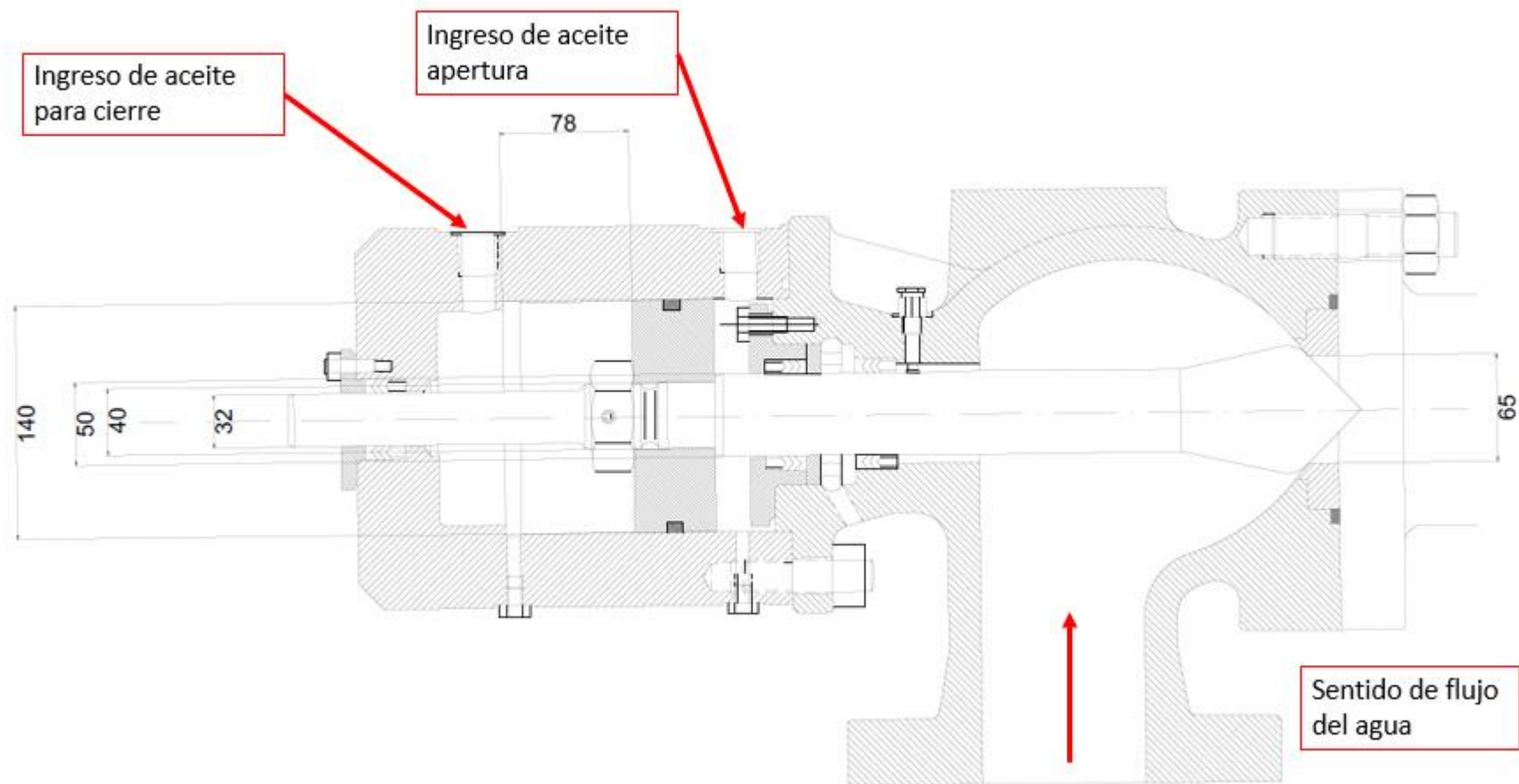


Figura 34. Válvula de aguja Sistema By-Pass

Nota: Este dibujo fue realizado con base en el plano original de la válvula fabricada por Neyrpic y no representa en su totalidad al equipo del sistema By-Pass, únicamente se realizó con fines educativos para la explicación de esta metodología. Las dimensiones que se ven en el esquema son únicamente ilustrativas y no son para fabricación.

En la Figura 34 se encuentran las dimensiones del actuador que permite el movimiento de la aguja de esta válvula del By-Pass. En la Tabla 15 se puede ver el resumen de estas dimensiones.

Tabla 15. Dimensiones del actuador – Válvula de aguja Sistema By-Pass

DIMENSIONES ACTUADOR VÁLVULA DE AGUJA - SISTEMA BY-PASS		
Dimensión	Valor	Unidad
Diámetro del pistón	140	mm
Diámetro del vástago Cámara de cierre	32	mm
Diámetro del vástago Cámara de apertura	50	mm
Carrera del pistón	78	mm
Volumen de apertura	0,0010	m ³
Volumen de apertura	1,05	l
Volumen de cierre	0,0011	m ³
Volumen de cierre	1,14	l
Volumen total	2,19	l

Este actuador esta dimensionado para trabajar bajo la presión de operación de la unidad hidráulica del regulador de velocidad mencionados en la Tabla 1 del numeral 6.1.1. En caso de presentarse cambios en las dimensiones de la válvula o, en el caso de contrario un cambio de presión de trabajo en la unidad hidráulica que suministre aceite a este equipo, se deben validar las fuerzas de accionamiento de este actuador para verificar que realice efectivamente su operación de acuerdo con la presión del agua de la conducción. Es decir, para el caso de aplicación que se tiene, verificar que, para la apertura de esta válvula, la fuerza ejercida por la presión del aceite en el pistón sea mayor a la fuerza ejercida la presión del agua en la punta de la aguja. Debido a que, se considera mantener las condiciones de operación en la unidad hidráulica del regulador, garantizando la operación del sistema de pilotaje como se puede ver en el numeral 7.4.1.1.1, las dimensiones de este equipo deben permanecer para garantizar su funcionamiento.

Por otra parte, debido a que las tuberías de este sistema serán en acero inoxidable, se propone que esta válvula de aguja sea fabricada con acordes a este material como lo son los estándares API 603 (American Petroleum Institute, 2019) y ASME B16.34 (American Society of Mechanical Engineers, 2017). Un caso idéntico se presenta con las válvulas de guarda con las que cuenta el sistema en las conexiones aguas arriba y aguas abajo de válvula esférica, ya que se deben especificar estas normas para su fabricación en acero inoxidable.

Se debe considerar uno de los puntos más importantes en la optimización de este sistema y son las conexiones aguas arriba y aguas debajo de la válvula esférica ya que como se mencionó anteriormente, es de alta probabilidad que los elementos que se encuentren instalados cuenten con bridas o conexiones fabricadas con base en estándares europeos, donde este caso no es excepción ya que sus válvulas cuentan con norma de bridas EN1092

(British Standards Institution, 2018). Partiendo de la premisa que la válvula esférica no va a ser cambiada, todos los elementos que estén directamente conectados a la conducción o válvula esférica deben ser compatibles con dicha brida, esto indica que las válvulas de guarda ubicadas en estas conexiones con la conducción deben ser acordes a dicha norma. Continuando con la especificación de avance de bridas, se considera que para esta aplicación es aceptable la norma BS EN 558 Series 26 (ver tabla 5 – Gate valves, (British Standards Institution, 2022). Para la selección de la norma de brida se debe identificar con las válvulas y elementos actuales del sistema, procedimiento realizado en el numeral 7.3.1.

Adicional a esto, se debe considerar el uso en kits de aislamiento en estas conexiones siendo el caso donde se tenga contacto entre acero inoxidable y acero al carbono.



Figura 35. Válvulas presentes en sistema By-Pass

En resumen, se tiene la siguiente información del sistema By-Pass modernizado:

Tabla 16. Características tubería sistema By-Pass modernizado

Característica	Valor	Unidad
Diámetro de tubería	4	in
Schedule de la tubería	SCH 80	
Material de la tubería	Acero inoxidable 316L (ASTM A382)	

Tabla 17. Válvula de aguja – Sistema By-Pass Modernizado

Descripción	Característica
Diámetro de la válvula de aguja	DN100
Presión nominal de la válvula de aguja	PN100
Norma de fabricación	API 603
Norma de bridas	BS EN 1092 - 1
Norma de avance de bridas	EN 558 Series 26
Operación	Actuador oleo hidráulico

Tabla 18. Válvulas de guarda (Mantenimiento) – Sistema By-Pass Modernizado

Descripción	Característica
Diámetro de las válvulas de mantenimiento	DN100
Presión nominal	PN100
Material	Acero inoxidable 316
Norma de fabricación	ASME B16.34
Norma de brida	BS EN 1092 - 1
Norma de avance de bridas	EN 556 Series 26
Operación	Manual con reductor mecánico - engranaje
Kit de aislamiento	Se requiere kit de aislamiento en las conexiones con la conducción aguas arriba y aguas abajo. Esto incluye empaques, mangos aislantes para los pernos, arandelas aislantes y arandelas metálicas.

7.4.1.2.2 Caso de aplicación memoria de cálculo sistema de drenajes

Realizando un procedimiento de diseño similar al sistema By-Pass descrito en el numeral 7.4.1.2.1, se procede por la verificación de las dimensiones de la tubería del sistema de drenaje utilizando la norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016) por medio de la Ecuación 13. En la siguiente tabla se muestran las variables utilizadas para el caso en cuestión.

$$t_m = \left(\left(\frac{P * D_o}{2 * (S * E + P * y)} \right) + A \right) * (1 + t_f)$$

Tabla 19. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema de drenaje

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
P	Presión interna de diseño	Presión de trabajo del sistema. ¹²	9611	kPa
Do	Diámetro exterior de la tubería	Normas ASME B36.10 y ASME B36.19. ¹³	88,9	mm
S	Esfuerzo admisible máximo del material	Esfuerzo admisible del acero inoxidable 316L. Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ¹⁴	115142,4	kPa
E	Eficiencia de la junta	Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ¹⁴	1	
y	Coeficiente de temperatura de diseño	Valor tomado de la tabla 104.1.2, norma ASME B31.1 Aceros austeníticos con temperatura de trabajo menor a 482°C. ¹⁴	0,4	
tf	Tolerancia de fabricación	Se le suma un 12,5% al espesor por procedimientos de fabricación. ¹⁵ [4]	12,5	%
A	Espesor adicional	Espesor adicional por corrosión.	1,5	mm

NOTAS:

Con las variables de la Tabla 19, se determina que el espesor requerido es de 5,73 mm, por lo que se define que la tubería debe ser SCH 80. De acuerdo con la norma ASME B36.19 (American Society of Mechanical Engineers, 2018) tiene un espesor de 7,62 mm.

$$t_m = 5,73 \text{ mm}$$

Para el caso de las válvulas de guarda presentes en el sistema de drenaje, se realiza un procedimiento similar al caso de las válvulas del By-Pass. En este sistema se presentan válvulas de guarda en las conexiones al cuerpo de la válvula esférica como al distribuidor

¹² Salto neto de la central de 810 metros (ver numeral 4.1) teniendo en cuenta un factor de sobrepresión de 1,21.

¹³ Referencias: (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

¹⁴ Referencias: ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016), ASTM A312 (International, ASTM A312 - Standard Specification for Seamless, Welded and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless-Steel Pipes, 2022) y ASTM A358 (International, ASTM, 2019)

¹⁵ Referencias: ASTM A53 Par 12.2 (International, ASTM A53 - Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless, 2022) y ASME A106 Par 18.2 (International, ASTM A106 - Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, 2019)

de chorros de la turbina, el cual es la conducción del agua hacia la turbina aguas abajo de la válvula esférica.

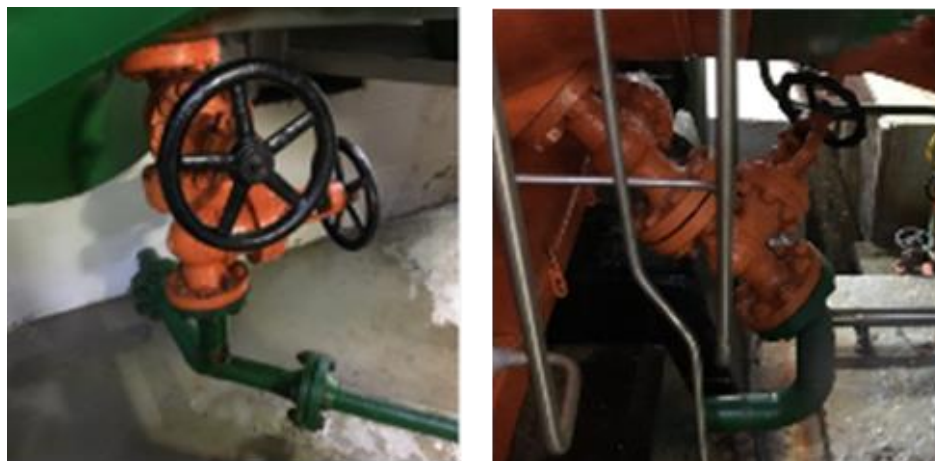


Figura 36. Válvulas de guarda Sistema de drenajes existente

Tal como se realizó la especificación de normativa de estas válvulas presentes en el sistema By-Pass (Ver numeral 7.4.1.2.1), se deben especificar las normas de fabricación, normas de bridas, avances de bridas y accionamiento de las válvulas de guarda. Para mantener una estandarización con los elementos seleccionados en los sistemas que se encuentran en el alcance de este documento se define que las normas para estas válvulas de guarda del sistema de drenaje deben ser acordes a lo especificado en las presentes en el sistema By-Pass. De acuerdo con lo anterior y las dimensiones de la tubería seleccionada, se mencionan en la Tabla 20 las características de las válvulas de guarda.

Tabla 20. Válvula de guarda (Mantenimiento) – Sistema de drenajes modernizado

Descripción	Característica
Diámetro de las válvulas de mantenimiento	DN80
Presión nominal	PN100
Material	Acero inoxidable 316
Norma de fabricación	ASME B16.34
Norma de brida	BS EN 1092 - 1
Norma de avance de bridas	EN 556 Series 26.
Operación	Manual con reductor mecánico - engranaje
Kit de aislamiento	Se requiere kit de aislamiento en las conexiones con la conducción aguas arriba y aguas abajo. Esto incluye empaques, mangos aislantes para los pernos, arandelas aislantes y arandelas metálicas.

7.4.1.3 Memoria de cálculo para sistema contrachorro

Tal como se menciona en el numeral 5.2.3, los elementos que conforman la tobera de frenado son tuberías, válvulas de guarda para mantenimiento, válvula de accionamiento y boquilla ubicada en el recinto de turbina para el frenado del rodete. A simple vista, puede verse una similitud en cuanto a elementos con respecto al sistema By-Pass, pero el contrachorro es un sistema de emergencia que debe estar disponible al momento en que se requiera y su uso generalmente no es tan frecuente.

Previamente al desarrollo de la memoria de diseño para el sistema contrachorro se debe considerar que el realizar un cambio en cuanto a dimensiones o posición de la boquilla puede generar efectos negativos en el rodete y en la eficiencia del sistema. En otras palabras, el movimiento de la ubicación y el cambio de las condiciones del chorro de este sistema puede afectar la integridad de los cangilones de la turbina y afectar el tiempo de frenado de emergencia en caso de accionar la tobera de frenado.

Para la memoria de diseño del sistema contrachorro, se comienza por analizar el elemento actuador. Al ser un sistema que debe generar el movimiento inverso que genera el inyector en el rodete, el actuador es una válvula de aguja, la cual hace un funcionamiento similar al inyector permitiendo el paso de agua por medio de una aguja que se hace su recorrido con un pistón actuado por aceite de una unidad hidráulica.

Como primer tema a analizar en esta válvula es el material del vástago, la punta de este y la carcasa de la válvula, ya que en caso de que se presenten fugas o paso de agua debido a deterioro del material, esto presenta condiciones de operación no deseadas en la turbina, generando deficiencias de generación en la unidad. De esta manera se busca tener un material con mejores propiedades mecánicas, alta dureza y resistencia a la corrosión debido a las condiciones de operación de este equipo. Como segundo tema a analizar en equipo es su accionamiento, donde se debe tener en cuenta el volumen, presión y filosofía de funcionamiento de la válvula con el fin de asegurar el cierre de esta válvula y no permitir paso de agua hacia la turbina.

Continuando con la memoria de diseño de la tobera de frenado, se realiza la selección de las válvulas de guarda para este sistema de una manera similar al procedimiento realizado en el numeral 7.4.1.2, especificando su norma de fabricación, norma de brida, norma de avance de brida, operación, diámetro y presión nominales.

Para finalizar se realiza un análisis para determinar el espesor de la tubería requerida de acuerdo con el material seleccionado por medio de la norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016).

De esta manera, la estructura para el dimensionamiento de un sistema contrachorro modernizado se muestra en la Figura 37.

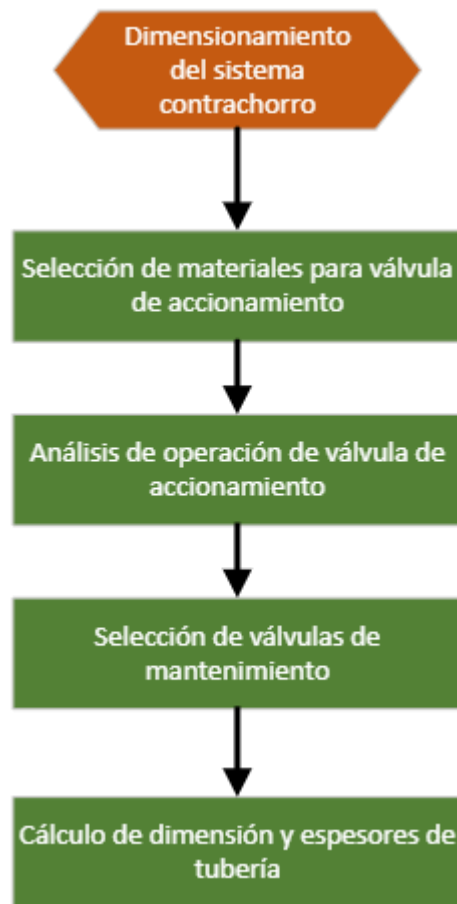


Figura 37. Estructura dimensionamiento Sistema contrachorro

7.4.1.3.1 Caso de aplicación memoria de cálculo sistema contrachorro

De acuerdo con lo descrito en el numeral 6.1.3, la válvula de aguja DN150 es conformada por una carcasa en acero al carbono y cuenta con un vástago y punta fabricados en acero inoxidable. Debido a su similitud con el funcionamiento del inyector de la turbina se toman como base los materiales utilizados en este equipo para evitar problemas de corrosión o desgaste que afecten la eficiencia del sistema e incluso perjudicar la generación de energía de la unidad.

De acuerdo con lo anterior, comenzando por el vástago de la válvula de aguja se propone el material ASTM A276 Tipo 410, mejorando sus propiedades mecánicas y dureza, considerando que estos que se encuentran actualmente ya llevan en operación más de 40 años. Este material propuesto se puede encontrar en los vástagos de los inyectores de las turbinas por lo que, para este caso de aplicación es viable su uso. En la Tabla 21 se muestra una comparativa del material actual y el propuesto para el vástago de la válvula de aguja.

Tabla 21. Comparación de materiales para vástago de válvula de aguja – Sistema contrachorro

Propiedad	AISI 4024 ¹⁶	ASTM A276 Tipo 410 ¹⁷
Esfuerzo permisible	500 MPa	550 MPa
Esfuerzo último	600 Mpa	690 MPa
Módulo de elasticidad	190 Gpa	200 GPa
Dureza	180 HB	302 HB

Continuando, con la punta del vástago, con las mismas razones que se presentan en el vástago, la punta es un elemento que debe ser de muy buenas propiedades mecánicas, dureza alta y resistencia a la corrosión ya que este elemento, al estar la válvula cerrada, realizará un sellado para no permitir el paso de agua con un asiento presente en la conexión bridada a la salida de este equipo. De acuerdo con esto, para la punta intercambiable del vástago se propone un acero inoxidable X20Cr13 (AISI 420). En la Tabla 22 se muestra una comparación del material actual con el propuesto para la punta del vástago.

Tabla 22. Comparación de materiales para punta del vástago válvula de aguja – Sistema contrachorro.

Propiedad	AISI 4024 ¹⁶	X20Cr13 (AISI 420) ¹⁸
Esfuerzo permisible	500 MPa	620 Mpa
Esfuerzo último	600 Mpa	690 Mpa
Módulo de elasticidad	190 Gpa	215 Gpa
Dureza	180 HB	217 HB

En cuanto a la carcasa, la válvula actualmente es fabricada en acero al carbono GS45.3 y con el fin de contar con un equipo con mejores propiedades y alta resistencia, se propone un acero inoxidable para esta carcasa que tenga un buen comportamiento con el agua que presenta sedimentos que proviene de la conducción. Adicionalmente, la tubería de este sistema será en acero inoxidable por lo que este cuerpo debe contar con un material de este grupo. De acuerdo con lo anterior, el material propuesto es acero inoxidable 316L y en la Tabla 23 se muestran sus propiedades en comparación al actual.

Tabla 23. Comparación materiales carcasa válvulas de aguja – Sistema contrachorro.

Propiedad	GS 45.3 ¹⁹	Acero inoxidable 316L ²⁰
Esfuerzo permisible	230 MPa	170 Mpa
Esfuerzo último	450 Mpa	485 Mpa

¹⁶ Referencias: ASTM A29 (International, ASTM, 2020), ASTM A322 (International, ASTM, 2018), ASTM A519 (International, ASTM, 2017) y ASTM A752 (International, ASTM, 2010)

¹⁷ Referencia: ASTM A276 (International, ASTM, 2017)

¹⁸ Referencias: BS EN 10088 – 1 (British Standards Institution, 2014), ASTM A240 (International, ASTM, 2022) y ASTM A959 (International, ASTM, 2019).

¹⁹ Referencia: DIN 1691 – 1985 (International Organization for Standardization, 1985)

²⁰ Referencia: ASTM A240 (International, ASTM, 2022)

Propiedad	GS 45.3¹⁹	Acero inoxidable 316L²⁰
Módulo de elasticidad	194 GPa	200 GPa
Dureza	-	217 HB

En la, se muestra un esquema de la válvula de aguja instalada actualmente. Cabe aclarar que este dibujo fue realizado con base en el plano original de la válvula fabricada por Escher Wyss y no representa en su totalidad al equipo del sistema contrachorro, únicamente se realizó con fines educativos para la explicación de esta metodología.

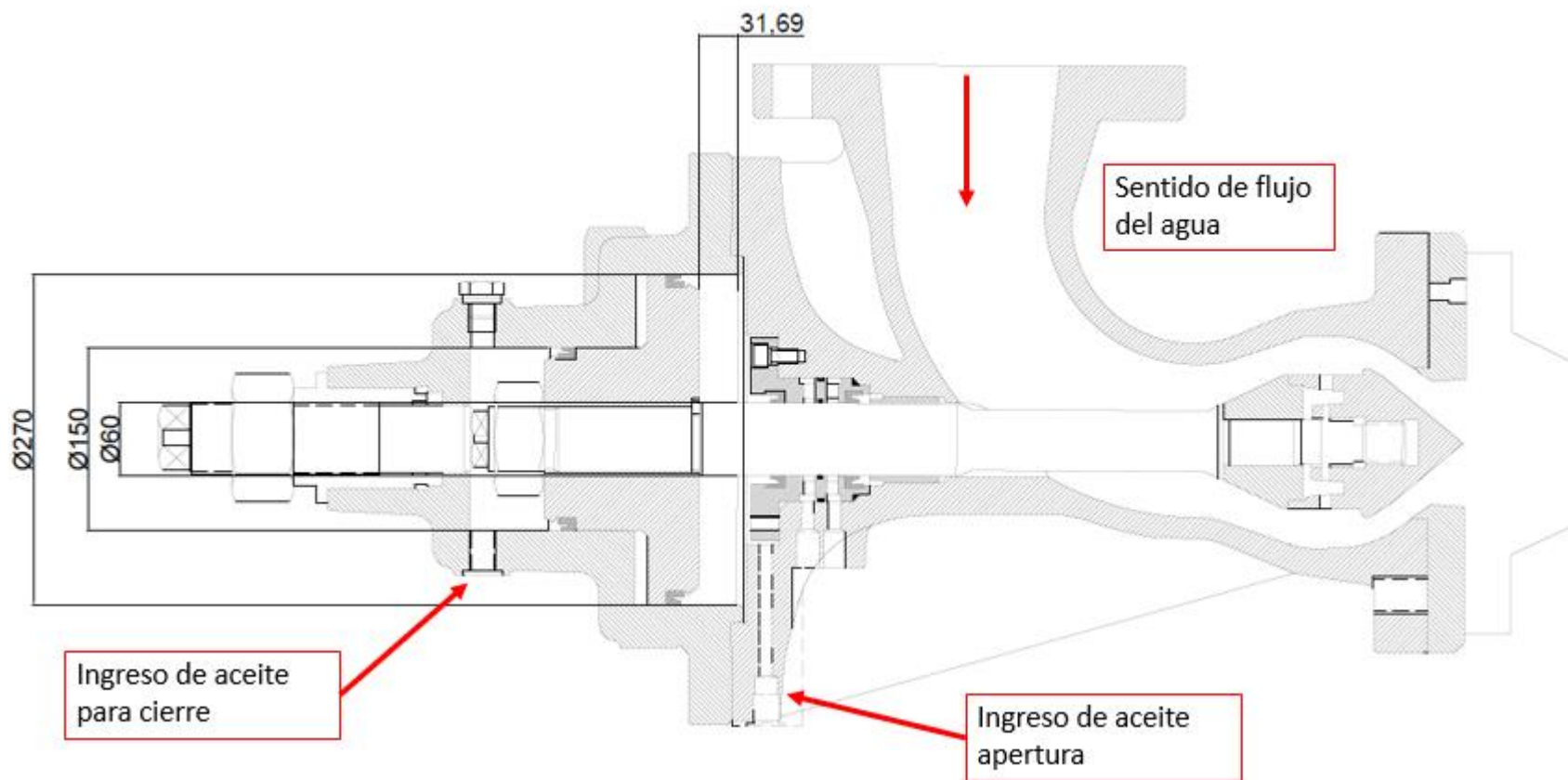


Figura 38. Válvula de aguja Sistema contrachorro.

NOTA: este dibujo fue realizado con base en el plano original de la válvula fabricada por Escher Wyss y no representa en su totalidad al equipo del sistema contrachorro, únicamente se realizó con fines educativos para la explicación de esta metodología. Las dimensiones que se ven en el esquema son únicamente ilustrativas y no son para fabricación.

En la Figura 38 se pueden ver las dimensiones del actuador que permite el movimiento de la aguja en la válvula de accionamiento del sistema contrachorro. En la se muestra el resumen de estas dimensiones.

Tabla 24. Dimensiones actuador válvula de aguja – Sistema contrachorro

DIMENSIONES ACTUADOR VÁLVULA DE AGUJA - SISTEMA CONTRACHORRO		
Dimensión	Valor	Unidad
Diámetro del pistón para apertura	270	mm
Diámetro del pistón para cierre	150	mm
Diámetro del vástago	60	mm
Carrera del pistón	31,69	mm
Volumen de apertura	0,0017	m3
Volumen de apertura	1,72	l
Volumen de cierre	0,0005	m3
Volumen de cierre	0,47	l
Volumen total	2,20	l

Como se puede observar en la Figura 38, el área donde el aceite ejerce presión para el cierre de la aguja es considerablemente menor al área de apertura, por lo que se garantiza que esta válvula va a estar cerrada siempre y cuando el aceite de apertura se encuentre a descarga. Como es el caso de la válvula de aguja del sistema By-Pass, las dimensiones de este actuador están dadas de acuerdo con la presión de trabajo de aceite de la unidad hidráulica mencionadas en la Tabla 1. En caso de presentarse algún cambio, ya sea en la presión de trabajo o en las dimensiones de este equipo, se deben verificar las fuerzas de accionamiento de la aguja y la fuerza ejercida por el agua en la punta del vástago para garantizar su funcionamiento. Es decir, en este caso, se debe garantizar que la fuerza ejercida por la presión del aceite en la cámara de apertura del pistón sea mayor a la fuerza ejercida por el agua en la punta de la aguja. Debido a que, se considera mantener las condiciones de operación en la unidad hidráulica del regulador, garantizando la operación del sistema de pilotaje como se puede ver en el numeral 7.4.1.1.1, las dimensiones de este equipo deben permanecer para garantizar su funcionamiento.

Con los materiales de la válvula y su accionamiento ya analizados, se procede a seleccionar las válvulas de guarda. En este sistema se deben considerar las mismas premisas en el caso del sistema By-Pass, especificando su norma de fabricación, norma de brida, norma de avance de brida, operación, diámetro y presión nominales. Estas características permitirán garantizar una conexión apropiada de los equipos con los nuevos y con los existentes, como lo pueden ser la conducción y la válvula esférica, que como se mencionó en el numeral 7.4.1.2.1, no se espera que estos dos sean cambiados en este alcance del caso. Por esta razón, las normas o estándares para tener en cuenta para la fabricación de las válvulas de guarda presentes en el sistema contrachorro se encuentran en la Tabla 25.

Tabla 25. Válvulas de guarda – Sistema contrachorro modernizado

Descripción	Característica
Diámetro de las válvulas de mantenimiento	DN150
Presión nominal	PN100

Descripción	Característica
Material	Acero inoxidable 316
Norma de fabricación	ASME B16.34
Norma de brida	BS EN 1092 - 1
Norma de avance de bridas	EN 556 Series 26
Operación	Manual con reductor mecánico - engranaje
Kit de aislamiento	Se requiere kit de aislamiento en la conexión con la conducción aguas arriba. Esto incluye empaques, mangos aislantes para los pernos, arandelas aislantes y arandelas metálicas.

Finalizando con la estructura planteada en la Figura 37, se procede a verificar el espesor requerido de la tubería de acuerdo con el material asignado. Para ello, se remite a la norma ASME B31.1 *Power Piping* (American Society of Mechanical Engineers, 2016), donde en el numeral 104.1.1 se explica como determinar el espesor mínimo de tubería sometida a presión interna. Por medio de la Ecuación 13 se obtiene este valor, donde en la Tabla 26 se muestran los valores de las variables requeridas por esta ecuación.

$$t_m = \left(\left(\frac{P * D_o}{2 * (S * E + P * y)} \right) + A \right) * (1 + t_f)$$

Tabla 26. Variables requeridas para norma ASME B31.1 – Sistema contrachorro

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
P	Presión interna de diseño	Presión de trabajo del sistema ²¹ .	9611	kPa
Do	Diámetro exterior de la tubería	Normas ASME B36.10 y ASME B36.19 ²² .	168,3	mm
S	Esfuerzo admisible máximo del material	Esfuerzo admisible del acero inoxidable 316L. Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ²³	115142,5	kPa
E	Eficiencia de la junta	Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.13 ³	1	

²¹ Salto neto de la central de 810 metros (ver numeral 6.1) teniendo en cuenta un factor de sobrepresión de 1,21.

²² Referencias: ASME B36.10M (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y ASME B36.19 (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

²³ Referencia: ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016)

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
y	Coeficiente de temperatura de diseño	Valor tomado de la tabla 104.1.2, norma ASME B31.1 Aceros austeníticos con temperatura de trabajo menor a 482°C ³	0,4	
tf	Tolerancia de fabricación	Se le suma un 12,5% al espesor por procedimientos de fabricación ²⁴	12,5	%
A	Espesor adicional	Espesor adicional por corrosión.	1,5	mm

Con las variables de la Tabla 26, se determina que el espesor requerido es de 9,33 mm, por lo que se define que la tubería debe ser SCH 80. De acuerdo con la norma ASME B36.19 (American Society of Mechanical Engineers, 2018) tiene un espesor de 10,97 mm.

$$t_m = 9,33 \text{ mm}$$

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, el sistema contrachorro sería conformado por tubería fabricada en acero inoxidable 316L, acorde con la norma ASTM A312 (International, ASTM, 2022) con un Schedule 80 que le permita soportar la presión de operación.

Tal como se mencionó en el numeral 7.4.1.3, un cambio en la ubicación de la ubicación del contrachorro puede afectar considerablemente la eficiencia de este sistema y deteriorar gravemente los cangilones de la turbina Pelton. Es por lo que el trazado de tubería no debe presentar cambios mayores. En este caso, se puede ver en la Figura 39 donde la tubería del sistema contrachorro atraviesa una pared para llegar al recinto de la turbina, por lo que dificulta su desmontaje y alta probabilidad de presentar problemas al realizar el montaje del sistema modernizado. Es en estos casos donde se debe plantear un alcance de modernización del sistema donde se puedan instalar equipos nuevos, pero a su vez su eficiencia no se vea afectada y no genere problemas graves en otros equipos. Cabe aclarar que, considerando no cambiar la tubería que se encuentra en la pared, se deben tener en cuenta el tipo de bridas con las que cuenta esta tubería actual y además implementar kits de aislamiento para prevenir el par galvánico en estas conexiones.

²⁴ Referencias: ASTM A53 Par 12.2 (International, ASTM, 2022) y ASME A106 Par 18.2 (International, ASTM, 2019)

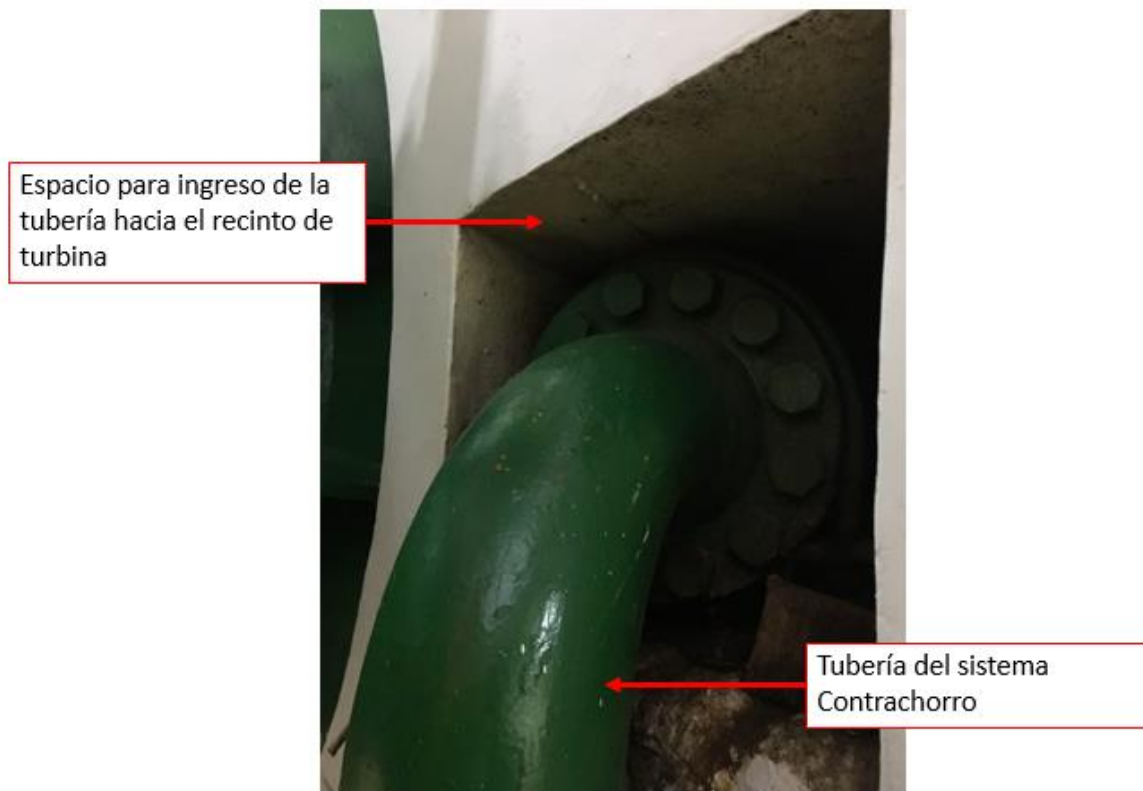


Figura 39. Sistema contrachorro – Trazado de tubería actual hacia recinto de turbina.

De acuerdo con lo anterior, la tubería presente en el sistema contrachorro modernizado cuenta con características mencionadas en la Tabla 27.

Tabla 27. Características de la tubería – Sistema contrachorro modernizado

Característica	Descripción
Diámetro de tubería	DN 150 (Ø6 in)
Schedule de la tubería	SCH 80
Material	Acero inoxidable 316L acorde a ASTM A312
Tipo de brida	BS EN 1092 – 1
Kit de aislamiento	Se requiere kit de aislamiento en la conexión con la conducción aguas arriba. Esto incluye empaques, mangos aislantes para los pernos, arandelas aislantes y arandelas metálicas.

7.4.1.4 Memoria de diseño para sistema de mando

El sistema de mando es el encargado de realizar el movimiento del cuerpo giratorio presente en la válvula esférica. Tal como se menciona en el numeral 5.2.4, este es conformado principalmente por el servomotor que realizará el movimiento, un trazado de tuberías que

permitirán dirigir el fluido al actuador y accesorios presentes como filtros y válvulas de mantenimiento.

Para comenzar la memoria de diseño de un sistema como este, se comienza por analizar el actuador con el que cuenta la válvula esférica. Estos equipos son dimensionados especialmente para cada válvula y generalmente cuentan con los mismos años de operación de la válvula. Es por ello que estos equipos deben ser analizados de manera que se pueda garantizar una alta vida útil (vida infinita), uno de los propósitos por los cuales se realiza una modernización de estos equipos. Esto implica analizar sus componentes respecto con respecto a las fuerzas de accionamiento del equipo para determinar que los materiales con los cuales sean fabricados no fallen en su operación por fatiga y pueda soportar las cargas en un número de ciclos de accionamiento altos. Estos análisis deben ser acordes a normas o estándares nacionales o internacionales que permitan dar veracidad al análisis como lo pueden ser DIN19704 (International Organization for Standardization, 1998) o API 579 – 1 (American Petroleum Institute, 2021).

Continuando con la memoria de diseño, se procede a determinar las características de la tubería mediante la selección del material, sus dimensiones y espesor permisible bajo las condiciones de operación del sistema. Esto también incluye selección de conexiones para los accesorios presentes como lo son las válvulas y los filtros, como también a la tubería de conducción de la central, siguiendo el principio de funcionamiento con agua descrito en el numeral 5.2.4.

Para la selección de las válvulas presentes en el sistema de mando se deben tener en consideración la norma de fabricación, tipo de conexión ya sea bridada, soldada o roscada con su respectiva norma, material de fabricación y accionamiento. Igualmente se debe tener en cuenta kits de aislamiento donde se presenten uniones de materiales que generen par galvánico durante el funcionamiento del sistema.

Es recomendable en este sistema contar con elementos filtrantes que garanticen un fluido de operación limpio y evitar fallas de los equipos que conforman el sistema de mando. Por ello, en sistemas donde es tomada el agua de la conducción se ubican filtros que, en primer lugar, puedan operar bajo las condiciones del sistema, y tengan una calidad de filtrado de acuerdo con los sedimentos presentes en el agua de la central. Es por esta razón que es de suma importancia que estos equipos de filtrado sean seleccionados de acuerdo con la caracterización de los sedimentos, las condiciones de operación del sistema y la caída de presión que generen, debido a que, si este último valor es considerablemente alto, puede afectar el funcionamiento del sistema al no poder operar el servomotor con la presión que llega a este equipo para abrir la válvula esférica.

En caso de contar con un fluido que contenga altos niveles de tamaño de partícula y concentración, se pueden instalar equipos en serie enfocados en diferentes rangos de tamaño de partícula, considerando su caída de presión para no afectar la operación del sistema de mando.

De esta forma, la estructura presente para el desarrollo de una memoria de cálculo para el sistema de mando se muestra en la Figura 40.

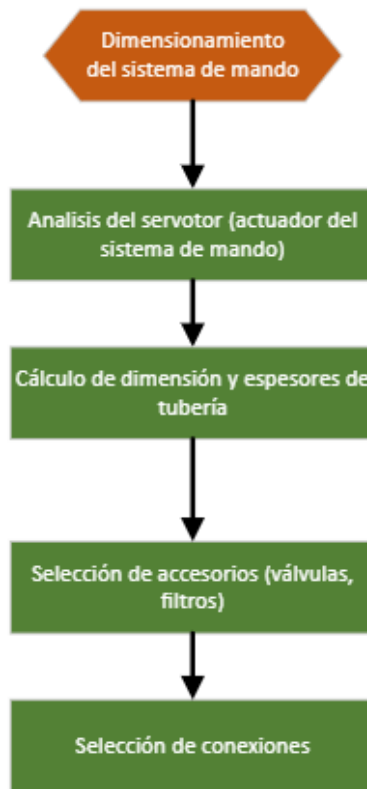


Figura 40. Estructura para dimensionamiento de sistema de mando.

7.4.1.4.1 Caso de aplicación memoria de cálculo sistema de mando

Retomando las características de este sistema mencionadas en la Tabla 2 y acorde a la estructura propuesta en la Figura 40, se procede a analizar el actuador que se presenta en la central Guatapé, caso de aplicación para el desarrollo de esta metodología. Para ello, se realizó el siguiente esquema del servomotor basado en el plano original de este equipo. Cabe aclarar que este esquema no representa en su totalidad al equipo fabricado por Neyrpic y este dibujo es únicamente desarrollado con propósitos educativos para la explicación de esta metodología.

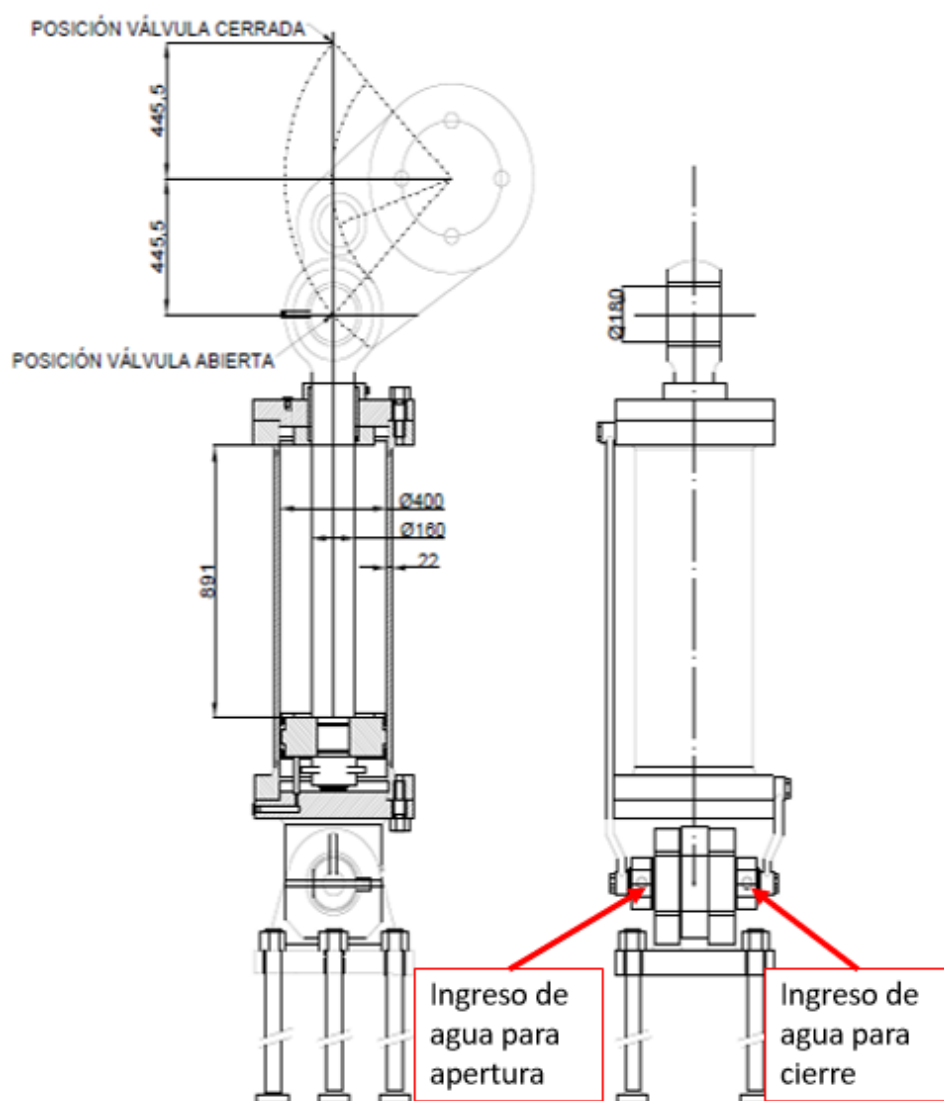


Figura 41. Esquema servomotor – Sistema de mando

Nota: esquema no representa en su totalidad al equipo fabricado por Neyrpic y este dibujo es únicamente desarrollado con propósitos educativos para la explicación de esta metodología. Las dimensiones que se ven en el esquema son únicamente ilustrativas y no son para fabricación.

De acuerdo con la Figura 41, el servomotor cuenta con las siguiente dimensiones:

Tabla 28. Dimensiones servomotor – Sistema de mando

Dimensión	Valor	Unidad
Diámetro externo del pistón	400	mm
Diámetro interno del pistón	120	mm
Diámetro del vástago	160	mm

Dimensión	Valor	Unidad
Carrera	891	mm

Realizando el primer paso de la estructura propuesta en la Figura 40, el análisis del servomotor comienza por un estudio de fatiga al cilindro que conforma las dos cámaras de accionamiento de este equipo, las cuales son llenadas con agua proveniente de la conducción para mover el pistón. Por esta razón, se puede determinar que el funcionamiento de este cilindro es similar a un recipiente a presión y para análisis de fatiga en estos casos se aplicable utilizar la norma API 579 – 1 *Fitness For Service* (American Petroleum Institute, 2021).

En el numeral 14.4.2.4 de la norma API 579-1 se describe el método C para análisis de fatiga, aplicable para todos los materiales, donde su procedimiento se enfoca, desarrollado en ocho pasos, en un análisis de acuerdo con los cambios de presión y de temperatura presentes durante el funcionamiento del recipiente. Debido a que el agua de la conducción no presenta cambios considerables de temperatura, solo se contemplará el método por cambio de presión.

Como primer paso para ello, se requiere definir el número de ciclos de carga y el rango de presión al que estará sometido el recipiente. Considerando un caso bastante crítico, se define que la operación del cilindro será de una (1) vez a la semana durante 40 años que es la cantidad máxima de tiempo de operación de acuerdo con la norma IEC BS EN 62256:2017 (British Standards Institution, 2017). Cabe resaltar que estas válvulas esféricas son operadas generalmente una vez al mes para realizar mantenimientos de los equipos, por lo que este número de ciclos es considerando un caso extraordinario. Por ello se define el siguiente número de ciclos:

Ecuación 18. Número de ciclos de operación del servomotor

$$N_{\Delta FP} = 1 * 52 \text{ semanas} * 40 \text{ años}$$

$$N_{\Delta FP} = 2080 \text{ ciclos}$$

Debido a que el fluido de operación de este equipo es el agua de la conducción, el rango de operación de este equipo se muestra en la

Ecuación 19. Rango de presión de operación del cilindro.

$$\Delta P_N = 810 \text{ m. c. a} * 9806,38 \frac{\text{Pa}}{\text{m. c. a}} * 1,21 * \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} = 9611,23 \text{ kPa}$$

Continuando con el método, se deben seleccionar el factor de fatiga C_1 de acuerdo con el tipo de construcción del recipiente. Este factor se encuentra en la tabla 14.3 de la norma de referencia. Considerando que este elemento será fabricado sin fallas, el valor de este factor es el siguiente:

Ecuación 20. Constante de fabricación acorde con norma API579-1

$$C_1 = 3$$

De acuerdo con lo anterior, se procede a determinar el número de ciclos permisible del material. Este valor se obtiene, evaluando el esfuerzo admisible del material por el factor de fatiga obtenido anteriormente en la curva de fatiga aplicable que se encuentra en el

anexo de la norma API 579-1 (American Petroleum Institute, 2021), específicamente la figura 14B.1M.

Para la fabricación del nuevo cilindro del servomotor se considera un acero al carbono ASTM A516 Gr. 70 (International, ASTM, 2017). De acuerdo con esta norma y con el estándar ASME Boiler & Pressure Vessel Code Part D (American Society of Mechanical Engineers, 2010), este material cuenta con las propiedades descritas en la Tabla 29.

Tabla 29. Propiedades mecánicas del material ASTM A516 Gr 70.

Propiedad	Valor	Unidad
Esfuerzo de fluencia	485	MPa
Esfuerzo admisible	260	MPa
Esfuerzo permisible ²⁵	140	MPa
Módulo de elasticidad	215	GPa

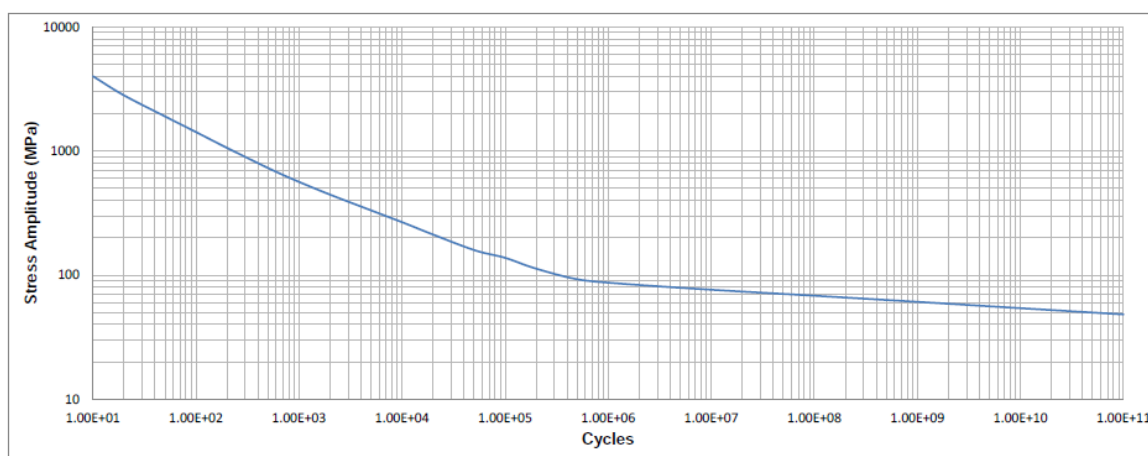


Figure 14B.1M – Fatigue Curve for Carbon, Low Alloy, Series 4XX, High Alloy Steels, And High Tensile Strength Steels For Temperatures not Exceeding 371 °C – $\sigma_{uts} \leq 552 \text{ MPa}$

Figura 42. Curva de fatiga aplicable al material seleccionado.

Para determinar este número de ciclos permisible se utilizan la Ecuación 21 y Ecuación 22, dadas por la norma en el numeral 14B.1.2 de la norma API 579-1.

Ecuación 21. Valor Y curva de fatiga aplicable API 579-1

$$Y = \log_{10} \left(28.3E3 * \left(\frac{S_a}{E_T} \right) \right)$$

Donde S_a hace referencia a la amplitud de esfuerzo al que se requiere obtener el número de ciclos y E_T al módulo de elasticidad del material.

²⁵ Esfuerzo obtenido de la norma ASME Boiler & Pressure Vessel Code Part D, tabla 5A. Especificación del material SA-516 Grado 70, designación UNS KO2700. Se considera un factor de seguridad de 0,8.

Ecuación 22. Valor X curva de fatiga aplicable API 579-1

$$X = -4706,5245 + 1813,6228 * Y + \frac{6785,5644}{Y} - 368,12404 * Y^2 - \frac{5133,7345}{Y^2} + 30,708204 * Y^3 + \frac{1596,1916}{Y^3}$$

Cabe aclarar que la Ecuación 22 es utilizada cuando se cumple el criterio descrito en la Ecuación 23. Si este criterio no se cumple, se debe revisar en el anexo de esta norma para la ecuación correspondiente.

Ecuación 23. Criterio para ecuación de X – API 579-1

$$10^Y \geq 20$$

De acuerdo con la Ecuación 21 y los valores descritos en la Tabla 29, el valor de Y, evaluando el producto de esfuerzo permisible del material por el factor de fabricación se muestra a continuación.

$$Y = \log_{10} \left(28,3E3 * \left(\frac{140 \cdot 10^6 * 3}{215 \cdot 10^9} \right) \right) = 1,74$$

Por lo tanto, el valor de X dado por la Ecuación 22 se muestra a continuación.

$$X = 3,51$$

El número de ciclos acorde con el valor X esta dado por la Ecuación 24, tomado de la norma API 579-1 numeral 14B.1.3.

Ecuación 24. Número de ciclos aplicables a la curva de fatiga.

$$N = 10^X$$

De acuerdo con los resultados obtenidos, el número de ciclos admisible del material se obtiene de la Ecuación 24.

Ecuación 25. Número de ciclos admisibles para ASTM A516 Gr 70.

$$N_{SC1} = 10^{3,51} = 3235,93 \approx 3235$$

Comparando los ciclos definidos de operación del cilindro y los ciclos admisibles del material seleccionado, se puede determinar que se cumple el requisito de operación si el cilindro es fabricado en dicho material.

$$N_{\Delta FP} < N_{SC1}$$

$$2080 \text{ ciclos} < 3235 \text{ ciclos}$$

Para terminar el análisis de fatiga en recipientes a presión por el método seleccionado, únicamente evaluando por cambios de presión, se debe cumplir el siguiente criterio.

Ecuación 26. Criterio de comparación rangos de fluctuación de presión API 579-1

$$\Delta P_N \leq \frac{P}{C_1} * \left(\frac{S_{N\Delta P}}{S} \right)$$

Este criterio realiza comparación entre el máximo rango de presión de operación del recipiente con un valor que incluye el factor de fabricación del cilindro, la amplitud de

esfuerzo evaluada en el número de ciclos requeridos en la curva de fatiga del material y esfuerzo permisible de este.

Realizando un proceso inverso al hecho para obtener el número de ciclos admisibles, la Ecuación 24, permitirá obtener el valor de X para el número de ciclos de 2080 que se define al inicio.

$$2080 = 10^X$$

$$X = 3,32$$

Con este valor, y por medio de la Ecuación 22, se determina el valor de Y.

$$Y = 1,8$$

Este valor permitirá definir la amplitud de esfuerzo correspondiente, mediante la Ecuación 21.

$$Y = \log_{10} \left(28.3E3 * \left(\frac{S_{N\Delta P}}{E_T} \right) \right)$$

$$S_{N\Delta P} = 483,77 \text{ MPa}$$

Evaluando el criterio descrito en la Ecuación 26, se obtiene el siguiente resultado

$$9611,23 \leq \frac{9611,23}{3} * \left(\frac{483,77 \cdot 10^6}{140 \cdot 10^6} \right)$$

$$9611,23 \text{ kPa} \leq 11070,64 \text{ kPa}$$

Como se puede ver el material cumple con el criterio definido. Los pasos siguientes descritos en el método corresponden a un análisis por cambios de temperatura, por lo que este procedimiento permite concluir que el material ASTM A516 Gr 70 para la fabricación del cilindro es aplicable y garantiza su operación de acuerdo con los ciclos definidos. En la Tabla 30 se muestran las variables utilizadas en este procedimiento con su descripción y su valor.

Tabla 30. Variables Método de Fatiga C – API 579 - 1

Variable	Descripción	Valor	Unidad
N _{ΔP}	Número de ciclos incluyendo inicio y apagado	2080	
ΔP _N	Rango de presión de operación	9611,23	kPa
C ₁	Constante de fabricación	3	
S	Esfuerzo permisible del material del código de	140	MPa

Variable	Descripción	Valor	Unidad
	construcción aplicable		
E_T	Módulo de elasticidad del material	215	GPa
N_{SC1}	Número de ciclos desde la curva aplicable de fatiga ($S \cdot C1$)	3235	
$S_{N\Delta P}$	Amplitud de esfuerzo de la curva aplicable de fatiga evaluada en $N\Delta P$	483,77	MPa

Luego de analizar el cilindro de este actuador, se procede a realizar el mismo procedimiento en el vástago. Este elemento se encuentra bajo dos casos de operación que se describen a continuación:

- Operación de apertura donde la presión del agua ejerce una fuerza distribuida en el pistón hacia abajo para realizar el recorrido del actuador. La fuerza debido al peso el vástago se encuentra en la misma dirección a la mencionada anteriormente y en la parte superior del vástago una fuerza de reacción donde se encuentra la conexión a la válvula esférica siendo la reacción. En la Figura 43 se encuentra un diagrama de cuerpo libre de este instante, antes de que se realice el movimiento de la válvula y vencer la oposición inicial del brazo. Este caso será designado para el vástago como tracción.
- Operación de cierre donde la presión del agua ejerce una fuerza distribuida en el pistón hacia arriba para realizar el recorrido del actuador. La fuerza debido al peso del vástago es hacia abajo, en el centroide de este equipo y la fuerza de reacción hacia arriba debido a la conexión de la válvula esférica y el movimiento realizado. En la Figura 44 se encuentra un diagrama de cuerpo libre de este instante, antes de realizar el movimiento de la válvula y vencer la oposición inicial del brazo. Este caso será designado para el vástago como compresión.

De acuerdo con las dimensiones dadas en la Tabla 28, los valores de área transversal del pistón y del vástago son los siguientes:

Tabla 31. Áreas del vástago y pistón – Servomotor de accionamiento

Propiedad	Variable	Valor	Unidad
Área del vástago	A_v	0,02	m^2
Área del pistón	A_p	0,11	m^2

Para este análisis se propone que el material para el vástago sea un acero inoxidable AISI 420, ya que cuenta con buena resistencia mecánica y es implementado en ejes para

turbinas. De acuerdo con la norma BS EN 10088-5 (British Standards Institution, 2009), este material cuenta con las siguientes propiedades:

Tabla 32. Propiedades Acero AISI 420 – BS EN 10088-5

Variable	Descripción	Valor	Unidad
Su	Esfuerzo de fluencia	700	MPa
Sy	Esfuerzo admisible	500	MPa

Para el caso a tracción, el diagrama de cuerpo libre se muestra en la Figura 43.



Figura 43. Diagrama de cuerpo libre Caso a tracción – Vástago servomotor

De acuerdo con el diagrama de la Figura 43, el esfuerzo presente en la sección transversal del vástago es calculado con la Ecuación 27:

Ecuación 27. Esfuerzo presente en el vástago – caso a tracción Vástago del servomotor

$$\sigma_v = \frac{F_v}{A_v}$$

Realizando un análisis estático del elemento, mediante una sumatoria de fuerzas verticales se puede determinar la fuerza resultante generada en el vástago del servomotor:

Ecuación 28. Sumatoria de fuerzas verticales – Caso a tracción Vástago del servomotor

$$\Sigma f_y = 0$$

$$F_p + F_{peso} = F_v$$

Donde,

Ecuación 29. Fuerza por la presión del agua – caso a tracción Vástago del servomotor

$$F_p = \text{Fuerza por la presión del agua}$$

$$F_p = P * (A_p - A_v)$$

Ecuación 30. Fuerza debido al peso del vástago y del pistón.

$$F_{peso} = \text{Fuerza debido al peso del vástago y del pistón}$$

$$F_{peso} = \text{Peso} * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

En la Tabla 33 se encuentran los valores y resultados obtenidos en el análisis a tracción del servomotor.

Tabla 33. Datos y resultados – Caso a tracción – Vástago servomotor

Variable	Descripción	Valor	Unidad
P	Presión del agua	9611,23	kPa
Fp	Fuerza por la presión del agua	865	kN
Peso	Peso del vástago y del pistón ²⁶	530	kg
Fpeso	Fuerza debido al peso	5,2	kN
Fv	Fuerza presente en el vástago	870,2	kN
σv	Esfuerzo presente en el vástago	43,51	MPa

²⁶ Dato tomado de las características del servomotor actual.

De acuerdo con la norma DIN 19704 – 1, numeral 9.5.3.2 *Fatigue strength* (International Organization for Standardization, 1998), para un análisis de fatiga se debe obtener un esfuerzo permisible del material de acuerdo con un factor de seguridad definido por la norma. Este esfuerzo está definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{R,d} = \sigma_{R,k} * Y_{Mf}$$

Donde,

Tabla 34. Propiedades del Material AISI 420 – Análisis de fatiga DIN 19704

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$\sigma_{R,k}$	Esfuerzo admisible del material	500	MPa
Y_{Mf}	Factor de seguridad	1,35	
$\sigma_{R,d}$	Esfuerzo permisible de fatiga	370,37	MPa

De acuerdo con este resultado se puede evidenciar que, para el caso de tracción, el esfuerzo presente en el vástago no supera el esfuerzo permisible de fatiga definido de acuerdo con la norma DIN 19704.

En la Figura 44 se muestra el diagrama de cuerpo libre para el caso a compresión presente en el vástago durante la operación del servomotor.



Figura 44. Diagrama de cuerpo libre – Caso a compresión – Vástago servomotor

Realizando el mismo procedimiento hecho en el caso a tracción, de acuerdo con el diagrama de cuerpo libre se analiza de manera estática el elemento mediante una sumatoria de fuerzas verticales.

$$\Sigma_{fy} = 0$$

Ecuación 31. Sumatoria de fuerzas verticales – Caso a compresión – Vástago del servomotor

$$F_p = F_v + F_{peso}$$

Con el valor obtenido de la fuerza debido al peso del vástago y del pistón en la Ecuación 30, se procede a determinar el valor de la fuerza por la presión del agua y definir el valor de la fuerza resultante que presente en el vástago.

$$F_p = P * A_p$$

Despejando F_v de la Ecuación 31, se puede obtener el valor de la fuerza resultante, dato requerido para determinar el esfuerzo presente en el vástago por medio de la Ecuación 27.

$$F_v = F_p - F_{peso}$$

Tabla 35. Datos y resultados – Caso a compresión – Vástago servomotor

Variable	Descripción	Valor	Unidad
P	Presión del agua	9611,23	kPa
Fp	Fuerza por la presión del agua	1,06	MN
Peso	Peso del vástago y del pistón ²⁷	530	kg
Fpeso	Fuerza debido al peso	5,2	kN
Fv	Fuerza presente en el vástago	1,05	MN
σ_v	Esfuerzo presente en el vástago	52,6	MPa

Con base en el esfuerzo obtenido para este caso en el vástago, que se muestra en la Tabla 35, y el esfuerzo admisible a fatiga del material seleccionado, el cual se encuentra en la Tabla 34, se puede confirmar igualmente que el material es apropiado para la fabricación del vástago.

Para finalizar el análisis de fatiga del servomotor, se procede con el pasador que se encuentra en el soporte a tierra de este equipo. En la Figura 45 se muestra el diagrama de cuerpo libre de este elemento.

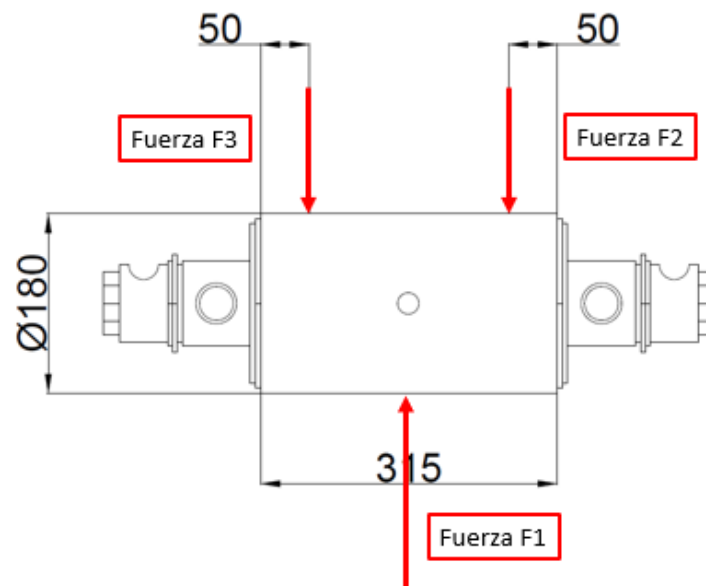


Figura 45. Diagrama de cuerpo libre pasador – Servomotor

Nota: Todas las medidas están dadas en milímetros.

²⁷ Dato tomado de las características del servomotor actual.

Para esta pieza se debe considerar la fuerza que ejerce el servomotor para el accionamiento de la válvula, que en este caso es la definida para la operación de cierre del servomotor. De esta manera, las fuerzas presentes en la Figura 45 tienen los siguientes valores

Ecuación 32. Fuerzas presentes en pasador - Servomotor

$$F_1 = F_v$$

$$F_1 = 1,05 \text{ MN}$$

$$F_2 = F_3 = \frac{F_1}{2}$$

$$F_2 = F_3 = 525 \text{ KN}$$

En la Figura 46 se muestra un diagrama de estas fuerzas presentes en el pasador.

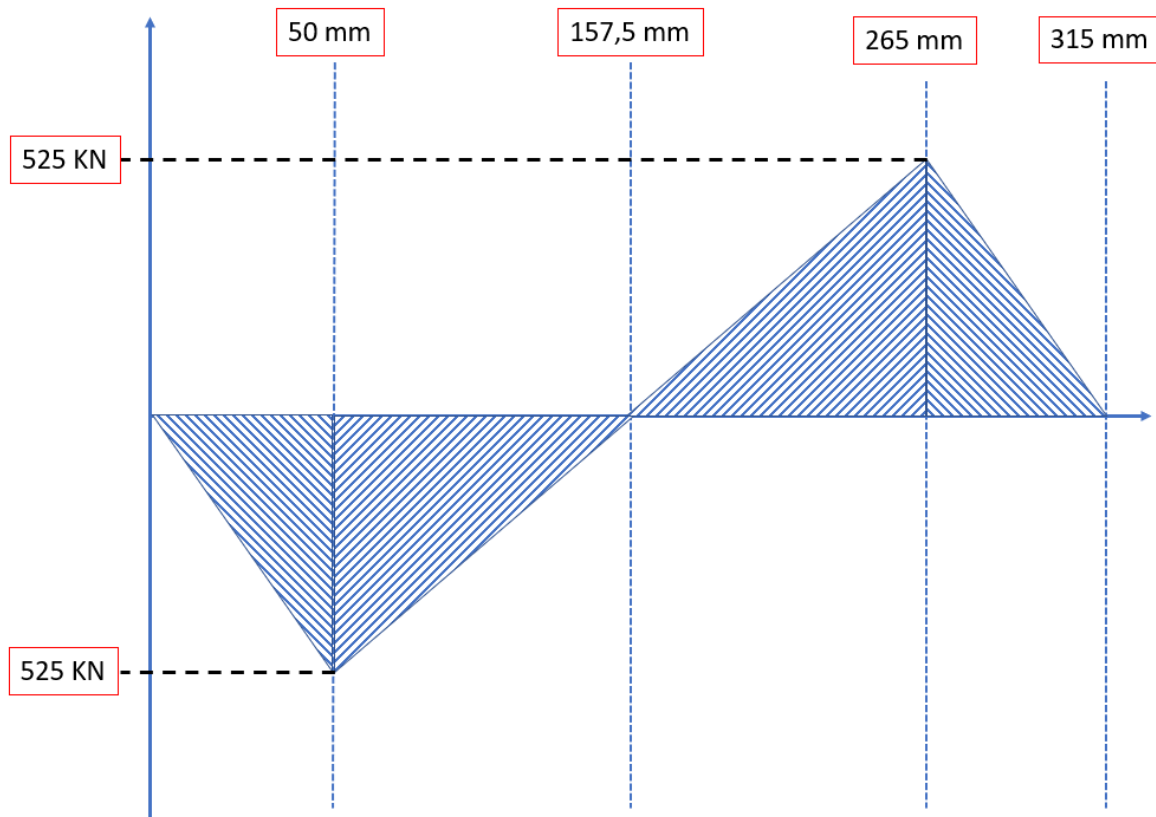


Figura 46. Diagrama de fuerzas presentes en el pasador – Servomotor. Con este resultado, se puede obtener el esfuerzo cortante generado en el pasador.

Ecuación 33. Esfuerzo cortante en el pasador - Servomotor

$$\tau = \frac{525 \text{ KN}}{A_{ps}}$$

Donde,

Ecuación 34. Área del pasador

$$A_{ps} = \text{área del pasador}$$

$$A_{ps} = 0,025 \text{ m}^2$$

Reemplazando este valor en la Ecuación 33, se obtiene el esfuerzo cortante presente en el pasador.

$$\tau = 20,63 \text{ MPa}$$

Considerando el material AISI 420 como opción para la fabricación de este elemento, se puede definir que, comparando este resultado con el esfuerzo admisible del material mostrado en la Tabla 34, se puede afirmar que es este material puede soportar las cargas de operación del pasador.

Retomando la estructura dada en la Figura 40, se procede a determinar los espesores en la tubería presente para este sistema de mando. Para ello, se evalúa en diferentes diámetros el criterio de presión interna dado por norma ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016). Seleccionando como material de la tubería el acero inoxidable 304, se muestran en la Tabla 36 sus propiedades.

Tabla 36. Propiedades Acero inoxidable 316L – Tubería Sistema de mando

PROPIEDADES DEL MATERIAL			
Propiedad	Variable	Valor	Unidad
Material de la tubería	Acero inoxidable 316L		
Esfuerzo de fluencia ²⁸	Sfl	172369,00	kPa
Esfuerzo admisible ²⁸	Sad	115142,49	kPa

Determinar el espesor requerido en la tubería se hace por medio de la Ecuación 13.

$$t_m = \left(\left(\frac{P * D_o}{2 * (S * E + P * y)} \right) + A \right) * (1 + t_f)$$

En la Tabla 37 se muestran los valores de cada una de las variables requeridas para determinar este espesor.

Tabla 37. Valores de variables requeridas en ASME B31.1 – Tuberías sistema de mando

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
P	Presión interna de diseño	Presión de trabajo del sistema ²⁹ .	9611	kPa

²⁸ Propiedades del material tomados de la norma ASME B31.1 - 2016 Power Piping - Mandatory Appendix A Allowable Stress Tables

²⁹ Salto neto de la central de 810 metros (ver numeral 6.1) teniendo en cuenta un factor de sobrepresión de 1,21.

Variable	Descripción	Justificación	Valor	Unidad
S	Esfuerzo admisible máximo del material	Esfuerzo admisible del acero inoxidable 316L. Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ³⁰	115142,5	kPa
E	Eficiencia de la junta	Valor tomado de la tabla A-3, norma ASME B31.1 ³³	1	
y	Coefficiente de temperatura de diseño	Valor tomado de la tabla 104.1.2, norma ASME B31.1 Aceros austeníticos con temperatura de trabajo menor a 482°C ³	0,4	
tf	Tolerancia de fabricación	Se le suma un 12,5% al espesor por procedimientos de fabricación ³¹	12,5	%
A	Espesor adicional	Espesor adicional por corrosión.	1,5	mm

A continuación, se presentan los resultados de esta ecuación evaluados en diámetros de tubería entre Ø1/8" y Ø 1 ½".

³⁰ Referencia: ASME B31.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2016)

³¹ Referencias: ASTM A53 Par 12.2 (International, ASTM, 2022) y ASME A106 Par 18.2 (International, ASTM, 2019)

Tabla 38. Espesores mínimos – Tubería sistema de mando

CÁLCULO DE ESPESOR REQUERIDO									
Diámetro NPS	ØOD (mm)³²	SCH		tm (mm)³³	tc (mm)³⁴	Resultado			
1/8	10,3	sch	SCH 80	2,16	2,41	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
1/4	13,7	sch	SCH 80	2,31	3,02	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
3/8	17,1	sch	SCH 80	2,46	3,2	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
1/2	21,3	sch	SCH 80	2,66	3,73	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
3/4	26,7	sch	SCH 80	2,90	3,91	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
1	33,4	sch	SCH 80	3,21	4,55	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
1 1/4	42,2	sch	SCH 80	3,60	4,85	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial
1 1/2	48,3	sch	SCH 80	3,88	5,08	Espesor aprobado	apropiado;	SCH	comercial

³² Diámetro exterior definido por las normas ASME B16.30 (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y ASME B16.39 (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

³³ Espesor mínimo determinado por la Ecuación 13 con los datos que se muestran en la Tabla 37.

³⁴ Espesor comercial definido por las normas ASME B16.30 (American Society of Mechanical Engineers, 2004) y ASME B16.39 (American Society of Mechanical Engineers, 2018)

De acuerdo con este resultado, el Schedule seleccionado para la tubería del sistema de mando es SCH80, fabricada en acero inoxidable 316L.

Para la selección de las válvulas presentes en el sistema de mando, utilizadas principalmente para realizar procedimientos de mantenimiento. Para ello, se debe definir la norma de fabricación, presión de operación, conexión y accionamiento, acorde a todos los diámetros de tubería presentes en el sistema de mando. En la Tabla 39 se muestran estas características.

Tabla 39. Características válvulas para sistema de mando

Descripción	Característica
Diámetro de las válvulas de mantenimiento	Entre DN6 hasta DN40
Material	Acero inoxidable 316 - ASTM A182 (International, ASTM, 2022)
Norma de fabricación	ASME B16.34
Clase	Clase 600
Norma de brida	ASME B16.5 (American Society of Mechanical Engineers, 2020)
Norma de conexión roscada	ASME B1.20.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2013)
Norma de avance de bridas	ASME B16.10 (American Society of Mechanical Engineers, 2017)
Operación	Manual
Kit de aislamiento ³⁵	Se requiere kit de aislamiento en la conexión con la conducción aguas arriba. Esto incluye empaques, mangos aislantes para los pernos, arandelas aislantes y arandelas metálicas.

Como se puede ver en la Tabla 39, se encuentran dos tipos de conexiones, bridada y roscada, esto para abarcar todos los diámetros de tubería. Para el caso de la conexión bridada, en la tubería se debe contar con bridas que cumplan con la norma descrita en la Tabla 39.

Para el caso de la conexión roscada se presentan dos soluciones, una primera donde la tubería se le realiza un roscado de acuerdo con la norma ASME B1.20.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2013) pero se debe considerar que este procedimiento le quita espesor a la tubería, por lo que es recomendable aumentar el Schedule seleccionado en la Tabla 38. La segunda opción que se presenta es el uso de bridas SAE de acuerdo con la norma ISO 6162 – 1 (International Organization for Standardization, 2012). De acuerdo con

³⁵ Este elemento se debe considerar en el caso donde se presente una conexión de la válvula bridada con elementos fabricados en acero al carbono con el fin de prevenir el par galvánico.

los tipos de norma, para las conexiones roscadas se cuenta con la disposición mostrada en la Figura 47.

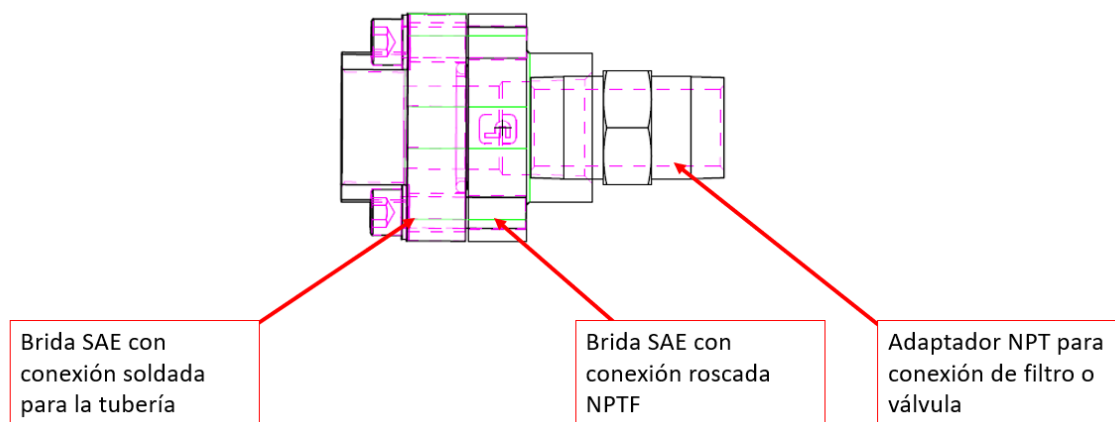


Figura 47. Disposición de bridas SAE y adaptador para conexión NPT

Nota:

1. El esquema de la brida SAE soldada fue tomado de catálogo de Parker, producto #16W7Q1BSXK (Parker Hannifin, 2023)
2. El esquema de la brida SAE roscada NPT fue tomado de catálogo de Parker, producto #16GQ1PSSK (Parker Hannifin, 2023)
3. El esquema del adaptador roscado NPT fue tomado de catálogo de Parker, producto #1 FF-SS (Parker Hannifin, 2023)

En la Figura 48 se encuentran las vistas correspondientes a la brida SAE con conexión soldada para la tubería. De igual forma, en la Figura 49 se encuentra la brida SAE con conexión roscada NPT y en la Figura 50 el adaptador roscado NPT. Todas estas tomadas del catálogo de Parker Hannifin.

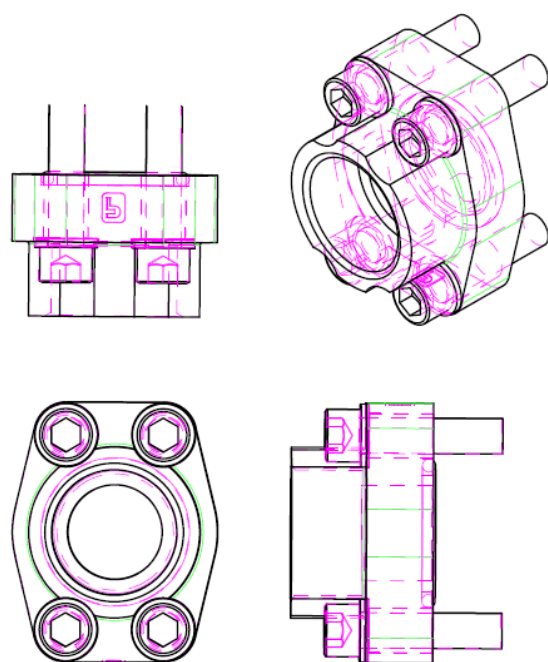


Figura 48. Vistas e isométrico Brida SAE soldada ISO 6162-1

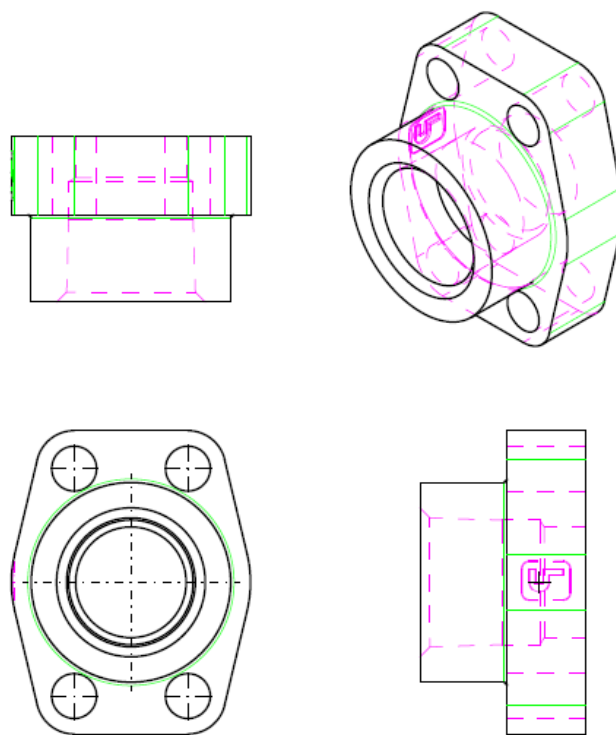


Figura 49. Vistas e isométrico brida SAE roscada NPT ISO 6162-1

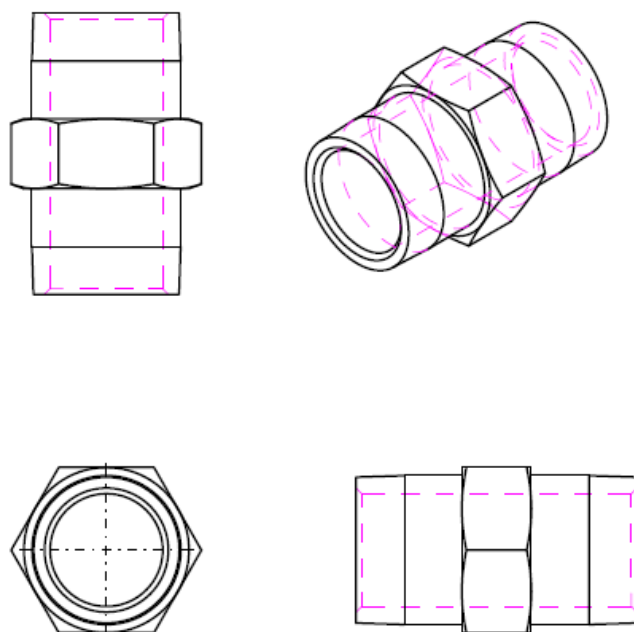


Figura 50. Vistas e isométrico Adaptador roscado NPT

Para finalizar el dimensionamiento del sistema de mando, se definen las características con las que debe contar el filtro a instalar para la limpieza del agua. Este equipo, tal como se mencionó en el numeral 7.4.1.4, debe tener la capacidad de operar bajo las condiciones del sistema. En la Tabla 40 se encuentran las características de este equipo.

Tabla 40. Características filtros para el sistema de mando

Característica	Descripción
Tipo de filtro	Filtro con malla en acero inoxidable
Mallado	10 μ
Conexión	Bridada ASME B16.5 o rosca NPT
Presión de operación	PN100
Material de la carcasa	Acero inoxidable

7.4.2 Simulación

Luego de contar con el dimensionamiento de los equipos que conforman cada uno de los sistemas auxiliares presentes, estas deben ser simuladas en un programa o software hidráulico con el fin de contar, en primer lugar, con un esquema donde se reúnan estos cuatro sistemas y su integración entre ellos. En segundo lugar, validar las características definidas en la memoria de diseño descritas en este documento en el numeral 7.4.1 y en tercer y último lugar, garantizar que cada uno de los sistemas cumplan con su respectiva filosofía de operación, tal como se definió en la etapa de estudios previos (ver numeral 7.3.2).

De esta manera, cada uno de los equipos principales comerciales deben ser caracterizados de acuerdo con lo ofrecido en el mercado. Es decir, las características definidas de la unidad hidráulica, cilindros hidráulicos y tuberías son las mínimas requeridas para la operación del sistema, por lo tanto, para mayor facilidad de adquisición de los equipos, se deben limitar a valores comerciales.

Consecuente con esto, las validaciones para realizar en la simulación son las siguientes:

7.4.2.1 Validaciones sistema de pilotaje

En el sistema de pilotaje se deben verificar las siguientes características:

- Fuerza generada por el cilindro hidráulico: Este valor se encuentra relacionado con las dimensiones del pistón y del vástago del actuador y además con la presión de operación definida por la unidad hidráulica. La fuerza generada por el cilindro hidráulico del sistema de pilotaje debe permitir el accionamiento de las válvulas pertenecientes al sistema de accionado para dar la orden de apertura y cierre del servomotor de la válvula esférica.
- Tiempo de accionamiento del cilindro hidráulico: Este valor es determinado de acuerdo con las dimensiones del cilindro hidráulico y además con el caudal de las bombas de la unidad hidráulica. Considerando que la simulación se realiza con características comerciales en los equipos principales, este valor debe ser ajustado y demostrado con un diagrama de estado del cilindro que permita identificar su tiempo de accionamiento.
- Secuencias de operación del sistema: esta característica debe ser verificada de tal manera que se muestre la relación entre el pilotaje y el accionamiento para la operación de la válvula esférica. De esta manera, se debe comprobar que, al terminar la operación del cilindro hidráulico del pilotaje, el servomotor de la válvula esférica debe comenzar su operación cumpliendo los lineamientos establecidos en la filosofía de operación en la etapa de estudios previos. (Ver numeral 7.3.2)

7.4.2.2 Validaciones sistema By-Pass

En el sistema By-Pass se debe verificar las siguientes características:

- Fuerza generada para la apertura de la válvula de aguja: hace referencia a la fuerza realizada con el aceite en el servomotor interno que se encuentra en la válvula de aguja. Esta fuerza debe ser suficiente para vencer aquella generada por el agua que pasa por la válvula y es aplicada en la punta de la aguja, para así garantizar que la presión del aceite y las dimensiones de la válvula son aceptables y correctas para el caso de aplicación en cuestión.
- Secuencia de operación del sistema: Se debe validar que cuando se realice la operación desde el equipo hidráulico que le suministre aceite a la válvula de aguja, accione correctamente el equipo y permita que este sistema By-Pass realice su función, igualando las presiones aguas arriba y aguas abajo para dar paso a la operación de apertura de la válvula esférica.

7.4.2.3 Validaciones sistema Contrachorro

En el sistema Contrachorro se debe verificar las siguientes características:

- Fuerza generada para la apertura de la válvula de aguja: hace referencia a la fuerza realizada con el aceite en el servomotor interno que se encuentra en la válvula de aguja. Esta fuerza debe ser suficiente para vencer aquella generada por el agua que pasa por la válvula y es aplicada en la punta de la aguja, para así garantizar que la presión del aceite y las dimensiones de la válvula son aceptables y correctas para el caso de aplicación en cuestión.
- Secuencia de operación del sistema: considerando que este sistema es usado únicamente en casos de emergencia, validar la secuencia de operación del sistema es importante debido al impacto que este genera en el rodete cuando es accionado. De esta manera, se debe verificar que su posición normal sea de cierre y en el momento en que se realice el comando de accionamiento desde el equipo hidráulico, este permita operar la válvula de aguja presente en el sistema contrachorro.

7.4.2.4 Validaciones sistema de accionamiento

En el sistema de accionamiento se debe verificar las siguientes características:

- Caída de presión en el sistema: cada uno de los elementos que conformen el sistema de accionamiento aportan una caída de presión que al final afectan las condiciones del agua que llega hasta el servomotor. De esta manera, se debe verificar a que presión llega el fluido de trabajo hasta el actuador y determinar si esta es suficiente para operar el servomotor y, por ende, la válvula esférica. Este valor de presión mínima de operación del servomotor es dado principalmente en la información de levantamiento (Ver numeral 7.3.1) o incluso por el fabricante del servomotor.
- Tiempo de operación del servomotor: Debido a que la válvula esférica no será cambiada, el sistema de accionamiento modernizado debe cumplir con el tiempo de operación definido de la válvula esférica. De esta manera, la simulación debe permitir identificar este tiempo y garantizar que no se presenten cambios en este valor o que se encuentre en el rango permisible definido por el fabricante en los documentos de referencia de la válvula esférica obtenidos en el levantamiento de información (ver numeral 7.3.1).
- Fuerza de operación del servomotor: de manera similar en lo ocurrido con el tiempo de operación, la fuerza generada por el servomotor debe ser suficiente para permitir la apertura y cierre de la válvula esférica. Estos valores se encuentran en la información recopilada en el levantamiento y el servomotor seleccionado para el sistema de accionamiento modernizado debe obedecer con estas condiciones.

7.4.2.5 Software de simulación

Se recomienda que el software con el que se realicen las simulaciones de estos sistemas cumpla con los estándares ISO 1219 – 1 (British Standards Institution, 2016) e ISO 1219 – 2 (British Standards Institution, 2012), los cuales definen la simbología de cada uno de los elementos presentes en sistemas hidráulicos. Esto es requerido debido a que los circuitos

realizados en el programa puedan ser entregados como esquemas para el cliente, los cuales deben cumplir con estos estándares para mayor comprensión.

Adicionalmente, el software debe permitir configurar los parámetros del fluido y de todos los equipos que se incluyan en el sistema. Es decir, permitir que cada uno de los elementos cuenten con las características, propiedades y dimensiones definidas en la memoria de cálculo de cada sistema. Softwares como Automation Studio, FluidSim hidráulica, Simster o aquellos recomendados por los fabricantes de equipos y sistemas hidráulicos como Rexroth, Parker, Festo y demás son los indicados considerando el cumplimiento de estándares internacionales y contando con la ventaja de tener equipos presentes en sus respectivos catálogos.

7.4.3 Integración 3D

Antes de comenzar con la elaboración de planos del sistema seleccionado, se procede a representar y desarrollar un modelo 3D que reúna la obra civil de la casa de máquinas, los sistemas actuales que no serán cambiados y los sistemas modernizados que fueron dimensionados en la memoria de cálculo en el numeral 7.4.1.

Dentro de las ventajas de comenzar por el desarrollo de un modelo 3D se encuentran las siguientes:

- Comprobar que los equipos seleccionados tengan la posibilidad de ser ubicados en los espacios disponibles en la casa de máquinas. Algunos fabricantes de estos equipos cuentan con la posibilidad de entregar la representación de su producto en un modelo 3D, el cual puede ser incluido en esta integración y contar con un sistema dimensionado preciso a lo ofrecido en el mercado.
- Comprobar la interacción entre los sistemas nuevos y los existentes. Es de gran importancia verificar que los equipos seleccionados si cumplan y se acoplen correctamente a aquellos sistemas que no serán cambiados. En los sistemas que se encuentran en el alcance de este documento, se deben verificar las conexiones de los sistemas by-pass, contrachorro y de accionamiento, ya que estos van directamente unidos a la conducción y la válvula esférica, elementos que no son cambiados.
- Realizar el trazado de tubería correcto evitando interferencias entre estos sistemas, la obra civil y aquellos elementos que no son cambiados en la casa de máquinas. Esto permite que los cálculos de pérdidas de presión cálculos en el sistema de pilotaje (ver Tabla 11) sean más precisos al caso en cuestión.
- Integrar la representación de los sistemas en un solo archivo. No solo se hace referencia a una disciplina, mecánica que es el caso que trata este documento, sino también todas aquellas incluidas en la modernización de la central. De manera que, en caso de alguna modificación de algún elemento o equipo, sea posible identificar interferencias e inconvenientes y desarrollar una solución más eficaz y de una manera ágil.
- Obtener un listado de equipos y elementos que conforman cada uno de los sistemas. Cada software de modelado 3D permite añadirle una descripción a los elementos que conforman un sistema y al final, obtener una tabla con la cantidad detallada de lo requerido para la implementación de cada uno de estos. Esta información al final se verá reflejada en el presupuesto de cada uno de los sistemas.

- Software de modelado 3D como lo son AutoDesk y SolidWorks permitirán que, a partir de este modelo, obtener los planos 2D de los sistemas con detalles y dimensiones requeridas para la licitación.

Para mayor agilidad en este proceso, es recomendable que, durante las visitas realizadas en el levantamiento de información en la etapa de estudios previos (ver numeral 7.3.1.2) se realice un mapeo de la casa de máquinas por medio de una nube de puntos que permita obtener la obra civil de este recinto y contar con dimensiones de los espacios disponibles en la caverna.

7.4.4 Elaboración de planos

El modelo 3D desarrollado en el numeral 7.4.3 permite elaborar de una forma automática y ágil los planos 2D para la licitación de los sistemas. En estos planos, lo ideal es mostrar, mediante isométricos y vistas, las dimensiones requeridas de los sistemas.

Cabe aclarar que, en primer lugar, los planos elaborados en este paso no son para fabricación debido a que estos serán de referencia para el contratista seleccionado en la licitación para fabricar e instalar el sistema y, por lo tanto, depende de los proveedores o de sus métodos de fabricación que el sistema presente algún cambio. No obstante, estas modificaciones no deben afectar la eficiencia del sistema y deben acoplarse correctamente a los sistemas existentes. En segundo lugar, las dimensiones más importantes a mostrar en estos planos son aquellas que dependen de la obra civil, de la válvula esférica o de equipos que no sean modificados, de tal manera que el contratista que reciba el plano identifique claramente cuales características son inalterables y se deben respetar en el sistema modernizado.

En los criterios de diseño (ver numeral 7.3.4) son definidas las unidades de medida en el desarrollo del proyecto, por lo que estos planos deben respetar dicha decisión. Adicionalmente, las vistas mostradas en cada uno de estos documentos deben ir ubicadas de acuerdo con un sistema en común, ya sea americano o europeo.

7.4.5 Presupuestos

El documento de presupuestos tiene como objetivo entregarle al administrador de la central, un costo de referencia para la modernización de los sistemas y, de manera simultánea, un criterio de evaluación en el proceso de licitación para la selección de fabricante o proveedor encargado del cambio de los equipos.

De acuerdo con lo anterior, en el presupuesto se debe considerar las consultas a los proveedor o fabricantes realizadas en la etapa de estudios previos, ya que ellos son los encargados de entregar las cotizaciones que serán reunidas en este documento. Estas cotizaciones realizadas deben incluir los siguientes ítems:

- Equipos seleccionados en los diseños
- Repuestos
- Procedimiento de desmontaje y montaje
- Puesta en marcha
- Transporte y logística para entrega en la central hidroeléctrica

Luego de contar con estas cotizaciones y con toda la información solicitada a los proveedores, se procede a reunirlos en una tabla que cuenta con la siguiente estructura:

Tabla 41. Formato de tabla de presupuestos

TABLA DE PRESUPUESTOS					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD TOTAL	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
PRECIO TOTAL DE LOS EQUIPOS					
VALOR DEL IVA APLICABLE					
PRECIO TOTAL INCLUIDO EL IVA					
AJUSTES E IMPREVISTOS INCLUIDOS EN LA INGENIERÍA					
PRECIO TOTAL					

Como se puede ver en la Tabla 41, el formato incluye la descripción de cada uno de los elementos que conforman el sistema, donde se debe incluir toda la información que sirva de referencia para el elemento, incluyendo normas internacionales de fabricación y de dimensión. La siguiente columna hace referencia a la unidad, donde se especifica si el ítem puesto en la tabla es vendido como unitario, como conjunto o por longitud, como lo puede la tubería. Continuando, se muestra la cantidad total de este ítem de acuerdo con la unidad determinada, el precio unitario del elemento y el precio total de este. Cabe aclarar que el presupuesto debe ser realizado basado en una moneda en común, por lo que, si se cuenta con precios en diferentes sistemas monetarios, deben establecerse tasas de cambio fijas y acordadas con una fecha exacta debido a la volatilidad del mercado.

En la parte final de la tabla se encuentra la sumatoria de precio total, el iva aplicable a este valor y un porcentaje adicional a este valor final donde se encuentran incluidos algunos ajustes o imprevistos que se presenten durante la ingeniería de detalle realizada por el contratista seleccionado en la licitación. Esto es algo similar a un factor de seguridad en el precio, con el fin de contar con un costo adicional que se pueda ver reflejado durante alguna actividad realizada en la adquisición de equipos, transporte, desmontaje, montaje y todas aquellas que impliquen la puesta en marcha del sistema.

7.4.6 Especificaciones técnicas

El documento de especificaciones técnicas es el de mayor importancia para el proceso de licitación. En este informe se reúnen todas las características que debe obedecer el sistema en cuestión, de manera que el fabricante entienda los requisitos y las condiciones con las que debe suministrar cada uno de los equipos.

En las especificaciones técnicas se deben reunir los siguientes temas, que posteriormente serán descritos y explicados de manera detallada:

1. Información general del proyecto de modernización
2. Objeto del documento
3. Descripción general de la central hidroeléctrica
4. Información sobre el sitio de la central hidroeléctrica
5. Alcance del suministro y del trabajo
6. Gestión, control y aseguramiento de la calidad
7. Especificaciones técnicas generales
8. Especificaciones técnicas particulares

7.4.6.1 Información general del proyecto de modernización

Inicialmente se debe introducir al contratista, interesado en participar en la licitación, sobre el proyecto a realizar, donde se debe indicar la central hidroeléctrica a tratar, el propósito y que sistemas serán modernizados. Esta información es únicamente de presentación para que el fabricante comprenda, de manera general, el trabajo que se realizará.

7.4.6.2 Objeto del documento

Debido a que una modernización puede abarcar diferentes sistemas, pertenecientes a la parte mecánica como también eléctrica o civil, cada uno de estos debe contar con un documento de especificaciones técnicas. Es por esto, que luego de explicar de manera general el proyecto, se debe describir el objeto del documento, el cual es definir las características técnicas del respectivo sistema.

7.4.6.3 Descripción general de la central hidroeléctrica

Como introducción, las especificaciones técnicas deben contar con una descripción de la central hidroeléctrica que será modernizada, mencionando donde se encuentra ubicada, su capacidad instalada, cuántas, y qué tipo de unidades tiene, en qué fechas fue construida y demás datos generales que le permitan al proponente (fabricante) hacerse una dimensión general de la central y adicionalmente, permita identificar donde se encuentra el sistema mencionado en el objeto del documento.

7.4.6.4 Información sobre el sitio de la central hidroeléctrica

Esta información difiere de la descrita en el numeral 7.4.6.3, debido a que en esta sección se describen las condiciones ambientales, sísmicas y aquellas consideraciones que son definidas debido a la ubicación geográfica de la central hidroeléctrica y pueden ser requeridas durante el dimensionamiento del sistema en cuestión. Generalmente se deben mencionar la altura al nivel del mar de la casa de máquinas de la central hidroeléctrica, lugar donde serán instalados los equipos nuevos.

Según lo anterior, se sugiere reunir la información de la central hidroeléctrica de acuerdo con la Tabla 42.

Tabla 42. Formato condiciones ambientales central hidroeléctrica

Parámetro	Valor
Altura del piso principal de la casa de máquinas sobre el nivel del mar	
Temperatura ambiente promedio	
Humedad relativa	

Parámetro	Valor
Piso térmico	

Tal como se mencionó en el párrafo anterior, se deben describir las condiciones sísmicas de la central hidroeléctrica y los estándares nacionales e internacionales que involucren la definición de estas condiciones y, además, aquellas que aseguren el correcto funcionamiento de los equipos de acuerdo con las características sísmicas presentadas. A continuación, se presentan algunas de estas:

- IEC 60068-3-3:2019: *Supporting documentation and guidance - Seismic test methods for equipment* (UNE Normalización Española, 2019)
- IEEE-693 *Recommended Practice for Seismic Design of Substations* (IEEE SA Standards Association, 2018)
- NSR-10 *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente* (Asociación Colombia de Ingeniería Sísmica, 2010)

7.4.6.5 Alcance del suministro y del trabajo

Tal como se aclara en la etapa de estudios previos, precisamente en el numeral 7.3.3, el alcance de la modernización debe de ser bastante claro para el fabricante debido a que no todos los equipos presentes en la central hidroeléctrica serán cambiados. De esta manera, en este apartado de las especificaciones técnicas, se debe dejar claramente descrito el alcance del suministro del fabricante que sea contratado en la licitación. Esto es, los equipos principales que debe suministrar con cantidades claras e igualmente, los entregables que este debe realizar durante el desarrollo del contrato y los servicios que debe incluir, ya sea transporte, desmontaje, montaje, pruebas, puesta en marcha y capacitación.

Se debe considerar que, los documentos realizados en esta metodología son con el propósito de contar con una ingeniería de detalle apta para la realizar un proceso de licitación y contratación de un fabricante. No obstante, estos documentos no son adecuados para una ingeniería de construcción, por lo que el contratista seleccionado, en la implementación del contrato, debe realizar todos los documentos necesarios para la construcción y montaje del sistema, incluyendo memorias de cálculos, planos de conjunto, ensambles y sub-ensambles, selección de equipos con fabricantes de acuerdo con los proveedores con los que cuente el fabricante, listado de pruebas a ejecutar y demás informes que sean requeridos por el administrador de la central que describan el sistema a instalar. Sin embargo, todos los equipos y elementos seleccionados deben ser acordes con lo descrito en este documento de especificaciones técnicas y ser aprobados por la empresa encargada de la central hidroeléctrica. Lo anterior es mencionado ya que en esta sección deben estar dichas responsabilidades del fabricante para darle claridad al alcance del trabajo y que entregables deben ser suministrados por parte de ellos al finalizar el contrato.

De los temas de suma importancia en esta metodología e igualmente en los procesos de licitación en estos proyectos es el alcance del fabricante y en este numeral, siendo reiterativo, se debe ser lo suficientemente explícito en su descripción y no generar dudas a aquellos proveedores o fabricantes que deseen ofertar para la modernización de los sistemas en la central hidroeléctrica.

7.4.6.6 Gestión, control y aseguramiento de la calidad

Debido a que el contratista, además de suministrar, probar, montar y poner en marcha los equipos incluidos en el alcance, debe entregar los documentos que respalden dichas actividades y garanticen que las características descritas en los numerales 7.4.6.7 y 7.4.6.8 sean cumplidas, tal como se menciona en el numeral del objeto y alcance del contratista (Ver numeral 7.4.6.5). De esta manera, se le debe exigir al contratista seleccionado un programa de gestión, control y aseguramiento de la calidad que le garantice a la empresa encargada de la central hidroeléctrica que todos los documentos generados y servicios contratados respetan estándares nacionales e internacionales, permitiendo tener bajo control todos los factores técnicos, administrativos y humanos que afecten la calidad de los productos. Adicionalmente, en este numeral se le debe exigir al contratista todas las certificaciones requeridas que respalden el uso de este sistema de gestión de calidad bajo las entidades correspondientes. Es generalmente exigido en este apartado el cumplimiento de la norma ISO 9001 (International Organization for Standardization, 2015).

7.4.6.7 Especificaciones técnicas generales

Para comenzar, en esta sección se le debe definir al contratista los requisitos generales que debe cumplir para el diseño del sistema modernizado. A continuación, se mencionan aquellas descripciones que deben estar incluidas en este numeral:

- Entidades nacionales o internacionales encargadas de la emisión de estándares aplicables al diseño de los equipos incluidos dentro del alcance de la modernización. Estos pueden ser ANSI, ASME, ASNT, ASTM, AWS, DIN, ISO, HI, AIS, AWWA, ICONTEC, entre otras.
 - Condiciones de diseño para los equipos: donde se describen precisamente los factores de seguridad que se debe considerar en el diseño y bajo que estándares nacionales e internacionales son seleccionados. Las normas que fueron consideradas en las memorias de cálculo (ver numeral 7.4.1) son claves en la definición de estos factores y por lo tanto deben ser mencionadas en este ítem, tales como:
 - DIN 19704: *Hydraulic Steel Structures* (International Organization for Standardization, 1998)
 - ASME B31.1: *Power Piping* (American Society of Mechanical Engineers, 2016)
 - ASME B16.34: *Valves – Flanged, Threaded and Welding End* (American Society of Mechanical Engineers, 2017)
- Igualmente, se deben mencionar aquellas que no fueron utilizadas en la memoria de cálculo, pero son aplicables al diseño, tales como:
- API 6D: *Specification for Pipeline and Piping Valve* (American Petroleum Institute, 2014)
 - AWS D1.1: *Structural Welding Code* (American Welding Society, 2015)
 - ASME B31.3: *Process Piping* (American Society of Mechanical Engineers, 2022)
- Descripciones detalladas de las condiciones requeridas en la entrega cada documento al finalizar, explicando la información que debe incluir en cada uno de estos y los datos de entrada considerables a los respectivos documentos. De igual

importancia, se debe precisar que cada informe debe ser aprobado por el administrador de la central hidroeléctrica.

- Requisitos aplicables a los materiales de fabricación de todos los equipos incluidos dentro del alcance, donde se especifique claramente en qué estado deben ser entregados, su calidad, estándares aplicables y el debido proceso a realizar en caso de proponer un material por fuera de las normas internacionales implementadas.
- Mano de obra requerida durante la implementación del trabajo, donde clarifique quien realiza el montaje, exigiendo métodos, técnicas y procedimientos reconocidos y aprobados que garanticen la correcta instalación y además, especificando si estas actividades serán supervisadas y quiénes serán los encargados. Además, se deben incluir certificaciones requeridas por el personal para la participación de estas actividades, como lo pueden ser en procesos de soldadura.
- Pruebas requeridas de materiales y componentes, ya sea en fabrica o en sitio, donde se especifique claramente quien es el encargado de dichas actividades, condiciones precisas de las pruebas como métodos, vigencias, estándares aplicables, supervisión e incluso, encargado del pago de estas pruebas.
- Inspecciones realizadas donde se definirá el encargado de realizar las funciones de verificación durante la fabricación, suministro, montaje y puesta en operación del sistema. Adicionalmente, se debe aclarar las responsabilidades del contratista respecto a estas inspecciones, como lo son, accesibilidad del inspector para las pruebas y apoyo requerido para la ejecución de su trabajo.
- Descripción del proceso de revisión y aprobación de los entregables por el contratista, donde se especifique las calificaciones del documento, quienes serán los encargados, los canales de comunicación por los que serán enviados los archivos y los procesos requeridos para las modificaciones o comentarios realizados durante las revisiones.

Como se puede ver de lo anteriormente descrito, este numeral se enfoca principalmente en los productos que debe entregar el contratista donde se especifique claramente su calidad, parámetros y procesos de validación de los equipos, servicios y documentos definidos dentro de alcance del suministro (ver numeral 7.4.6.5).

7.4.6.8 Especificaciones técnicas particulares

En las especificaciones técnicas particulares se definen los parámetros que son aplicables a cada uno de los elementos incluidos dentro del sistema. Esto es, definir claramente las características que debe contar el equipo a suministrar, incluyendo materiales, dimensiones y condiciones de operación basados en los estándares utilizados para sus dimensiones durante el desarrollo de las memorias de diseño en el numeral 7.4.1.

Es en esta sección donde son utilizadas toda la información final que defina el equipo en cuestión. Esta debe ser lo bastante clara ya que los demás documentos desarrollados en esta etapa son remitidos a esta sección de las especificaciones técnicas y deben estar acordes a lo descrito en cada uno de estos, con el fin de evitar confusiones de los contratistas e inconvenientes durante las actividades de fabricación, suministro, montaje y puesta en marcha del sistema.

Como se puede ver en el numeral del desarrollo de las memorias de diseño 7.4.1, cada sistema cuenta con un caso de aplicación (ver numerales 7.4.1.1.1, 7.4.1.2.1, 7.4.1.2.2,

7.4.1.3.1, 7.4.1.4.1) donde al final se resumen en tablas las características, las normas aplicables y las condiciones de operación de los equipos. En la sección de especificaciones técnicas particulares es de suma importancia mencionar estos datos.

Luego de contar con las descripciones detalladas de cada uno de los equipos, se añade un ítem dentro de las especificaciones técnicas particulares definido como características técnicas garantizadas. Este se enfoca en presentar una tabla donde reúne cada uno de los equipos dentro del alcance del suministro, con las características requeridas por las especificaciones y una columna donde el contratista debe llenar si cumple con lo definido. En la Tabla 43, se muestra la estructura de estas características técnicas garantizadas.

Tabla 43. Características técnicas garantizadas.

Ítem	Descripción	Características requeridas por el administrador de la central hidroeléctrica	Características que garantiza el proponente

De esta manera concluye el desarrollo de las especificaciones técnicas para la modernización del sistema en cuestión, donde se reúnen todas las actividades, pautas, requisitos y responsabilidades del contratista y del administrador para el desarrollo del contrato.

Con este documento finaliza la etapa de desarrollo técnico de la metodología para la modernización de los sistemas auxiliares mecánicos presentes en válvulas esféricas instaladas en centrales hidroeléctricas con turbinas tipo Pelton. Cabe aclarar que, este proceso es aplicable a otros sistemas mecánicos a modernizar presentes en estas centrales.

8 CONCLUSIONES

De este trabajo desarrollado, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En Colombia, cada vez se presentan nuevos proyectos para aumentar la capacidad energética como se puede ver en la Figura 2, pero de igual forma, tal como se ve en la Figura 1, varias centrales cuentan con varios años de operación, por lo que las opciones de modernizarlas o repotenciarlas son altas con el fin de evitar paros prolongados en actividades de mantenimiento preventivo o correctivo e incluso mejorar la capacidad de estas a una menor inversión en comparación a proyectos construidos desde cero.
- Las válvulas esféricas en las centrales son de suma importancia porque, a pesar de no ser parte del grupo generador de energía, es la encargada de proteger estos equipos ante alguna emergencia o incluso para poder permitir el acceso al rodete para actividades de mantenimiento. Es por ello, que estos sistemas que permiten su accionamiento y operación deben estar siempre en buen estado, confiables y eficientes.

- La central hidroeléctrica Guatapé cuenta con varios años de operación, que a lo largo de estos se le han efectuado procesos de modernización, lo que ha permitido que siga generando por más de 50 años. Es por esto que es un ejemplo a demostrar para que se justifique estos procedimientos de modernización en el resto de los proyectos presentes en el país.
- Se establecen las dimensiones de los equipos que conforman los sistemas auxiliares mecánicos presentes en las válvulas esféricas, cumpliendo un objetivo crucial el cual es contar con elementos que sean de diseño estandarizado, que permitan que las actividades de mantenimiento a realizar sean cortos y evitar paradas largas de la central y contar con una red de generación energética confiable y estable.
- La metodología para la modernización abarca incluso la estructura documental requerida que le permita, al oferente seleccionado en un proceso de licitación, entender de manera clara el alcance de los trabajos, los equipos a intervenir, las características de operación, los espacios disponibles para la ejecución de las actividades y las responsabilidades asignadas para realizar las actividades de fabricación, suministro, montaje y puesta en marcha de los equipos nuevos a instalar y su interacción con aquellos existentes.

9 BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS Switzerland. (1 de enero de 2020). *Valves for Hydropower Plants*. Obtenido de Valves for Hydropower Plants: <http://www.hnsa.com.co/wp-content/uploads/2015/10/ADAMS-Brosch%C3%BCre.pdf>
- AES CHIVOR. (2011). *Manejo de caudales en el embalse La Esmeralda*. Bogotá: AES CHIVOR.
- Alarcón, A. D. (25 de Septiembre de 2017). *Rehabilitar, repotenciar, modernizar: la nueva frontera para las hidroeléctricas de Latinoamérica*. Obtenido de Rehabilitar, repotenciar, modernizar: la nueva frontera para las hidroeléctricas de Latinoamérica: <https://blogs.iadb.org/energia/es/rehabilitar-repotenciar-modernizar-la-nueva-frontera-para-las-hidroelectricas-de-latinoamerica/>
- American Petroleum Institute. (2014). *API 6D: Specification for Pipeline and Piping Valve*. Washington: API.
- American Petroleum Institute. (2019). *API 603 - Corrosion-resistant, Bolted Bonnet Gate Valves - Flanged and Butt-welding Ends*. Washington: API.
- American Petroleum Institute. (2021). *API 579 - 1: Fitness For Service*. Washington: API.
- American Society of Mechanical Engineers. (2004). *ASME B36.10M - Welded and Seamless Wrought Steel Pipe*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2010). *ASME Boiler & Pressure Vessel Code Part D: Properties (Metric) Materials*. Nueva York: ASME.

- American Society of Mechanical Engineers. (2013). *ASME B1.20.1 - Pipe Threads, General Purpose, Inch*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2016). *B31.1 Power Piping*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2017). *ASME B16.10 - Face-to-Face and End-to-End Dimensions of Valves*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2017). *ASME B16.34 - Valves - Flanged, threaded, and Welding End*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2018). *ASME B36.19M Stainless Steel Pipe*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2020). *ASME B16.5 - Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS 1/2 through NPS 24, Metric/Inch Standard*. Nueva York: ASME.
- American Society of Mechanical Engineers. (2022). *ASME B31.3: Process Piping*. New York: ASME.
- American Welding Society. (2015). *AWS D1.1: Structural Welding Code*. Massachusetts: AWS.
- Asociación Colombia de Ingeniería Sísmica. (2010). *NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente*. Bogotá: Asociación Colombia de Ingeniería Sísmica.
- British Standard Institution. (2016). *EN 10305 - 1: Steel tubes for precision applications - Technical delivery conditions. Part 1: Seamless cold drawn tubes*. London: BSI.
- British Standards Institution. (2009). *BS EN 10088 - 5: Stainless Steels Part 5: Technical delivery conditions for bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes*. London: BSI.
- British Standards Institution. (2012). *BS EN 61362 - Guide to Specification of Hydraulic Turbine Governing Systems*. London: BSI Standards Publication.
- British Standards Institution. (2012). *BS ISO 1219 - 2: Fluid power systems and components - Graphical symbols and circuit diagrams*. London: BSI Standards Limited.
- British Standards Institution. (2014). *BS EN 10088 - 1 - Stainless Steels*. London: BSI.
- British Standards Institution. (2016). *BS ISO 1219 - 1: Fluid Power Systems and components - Graphical symbols and circuit diagrams*. London: BSI Standards Limited.
- British Standards Institution. (2017). *BS EN 62256 - Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Rehabilitation and performance improvement*. Londres: BSI Standards Limited.
- British Standards Institution. (2018). *BS EN 1092 - 1 - Flanges and their joints - Circular flanges for pipes, valves, fittings and accessories, PN designated*. London: BSI.

- British Standards Institution. (2022). *BS EN 558 - Industrial Valves - Face to face and Centre to face dimensions of metal valves for use in flanged pipe systems - PN and Class designated valves*. London: BSI.
- Celsia. (31 de 08 de 2022). *Nuestras centrales Hidroeléctricas*. Obtenido de Celsia: <https://www.celsia.com/es/centrales-hidroelectricas/>
- Electric Power Research Institute. (1999). *Hydro Life Extension Modernization - Volume 1: Overall Process*. Palo Alto, California: EPRI.
- Empresas Públicas de Medellín. (31 de 08 de 2022). *Centrales Hidroeléctricas EPM*. Obtenido de Empresas Públicas de Medellín: <https://cu.epm.com.co/institucional/sobre-epm/nuestras-plantas/plantas-de-energia/centrales-hidroelectricas-epm#Centrales-Generaci-n-516>
- IEEE SA Standards Association. (2018). *IEEE 693: Recommended Practice for seismic Design of Substations*. IEEE.
- International Organization for Standardization. (1985). *DIN 1691 - Steel castings for general Purposes*. Berlin: ISO.
- International Organization for Standardization. (1998). *DIN 19704-1*. Alemania: ISO.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 6162 -1: Hydraulic fluid Power - Flange connections with split or one-piece flange clamps and metric or inch screws - Part 1: Flange connectors, ports and mounting surfaces for use at pressures of 3,5 MPa (35 Bar) to 35 MPa (350 Bar), DN 13 to DN127*. Suiza: ISO.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001: Quality Management Systems - Requirements*. ISO Standards.
- International, ASTM. (2010). *ASTM A752 - Standard Specification for Wire Rods and Coarse Round Wir, Alloy Steel*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2017). *ASTM A276 - Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2017). *ASTM A516 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate - and Lower - Temperature Service*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2017). *ASTM A519 - Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2018). *ASTM A322 - Standard Specification for Steel Bars, Alloy, Standard Grades*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2019). *ASTM A106 - Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2019). *ASTM A358 - Standard Specification for Electric-Fusion-Welded Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steel Pipe for High-Temperature Service and General Applications*. Filadelfia: ASTM.

- International, ASTM. (2019). *ASTM A959 - Standard Guide for Specifying Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2020). *ASTM A29 - Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2022). *ASTM A182 - Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fitting, and Valves and Parts for high-temperature Service*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2022). *ASTM A240 - Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2022). *ASTM A312 - Standard Specification for Seamless, Welded and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipes*. Filadelfia: ASTM.
- International, ASTM. (2022). *ASTM A53 - Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*. Filadelfia: ASTM.
- Magnéto Hydraulique et pneumatique Inc. (26 de Julio de 2018). *Auxiliary Mechanical Systems For Energy Producción*. Obtenido de Groupe Magnéto Solutions integrator: <https://www.magneto.ca/en/projects/systemes-auxiliaires-mecaniques-pour-la-production-denergie/>
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2018). *Resolución 1402*. Bogotá: República de Colombia.
- Parker. (2015). *Heavy Duty Hydraulic Cylinders*. Illinois: Parker.
- Parker Hannifin. (01 de 01 de 2023). *Productos Parker Hannifin*. Obtenido de 4-Bolt Hydraulic Flanges and Components | #16W7Q1BSXK: <https://ph.parker.com/us/es/4-bolt-hydraulic-flanges-and-components/16w7q1bsxk>
- Parker Hannifin. (01 de 01 de 2023). *Productos Parker Hannifin*. Obtenido de 4-Bolt Hydraulic Flanges and Components | #16GQ1PSSK: <https://ph.parker.com/us/es/4-bolt-hydraulic-flanges-and-components/16gq1pssk>
- Parker Hannifin. (01 de 01 de 2023). *Productos Parker Hannifin*. Obtenido de Pipe Fittings and Port Adapters | #1 FF-SS: <https://ph.parker.com/us/es/pipe-fittings-and-port-adapters/1-ff-ss>
- Sierra, E., & Sgro, C. (2022). Envejecimiento de las centrales hidroeléctricas y posibilidades de modernización en Colombia. *VI Seminario de centrales hidroeléctricas* (pág. 39). Medellín: Andritz.
- STAUFF. (2022). *Multi-Way Ball Valves*. Werdohl: STAUFF.
- TIMSA Técnica e ingeniería de mezclas. (1 de Agosto de 2022). *Bombas de engranajes*. Obtenido de Bombas de engranajes: <https://www.timsa.com/equipos-de-bombeo/bombas-de-engranajes/>

- UNE Normalización Española. (2019). *UNE-EN IEC 60068-3-3: Supporting documentation and guidance - Seismic test methods for equipment*. Madrid: UNE.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2020). *Plan de expansión de referencia Generación - Transmisión 2020 - 2034*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2022). *Informe de registro de proyectos de generación de electricidad*. Bogotá: Ministerio de Minas y energía.
- Vortex Hydra Innovation & Engineering. (23 de Agosto de 2022). *Spherical Valves Custom Made Valves*. Obtenido de Spherical Valves Custom Made Valves: <https://www.vortexhydradams.com/hydraulic-works/spherical-valves/>
- Wikipedia. (29 de Julio de 2022). *Central Hidroeléctrica El Guavio*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica_del_Guavio