



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE
REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL**

Gustavo Alberto Concoguá López

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, febrero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE
REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GUSTAVO ALBERTO CONCOGUÁ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy OlympoPaiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figuera Vásquez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Héctor Alexander Juárez Reyes
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha de 4 de octubre de 2016.



Gustavo Alberto Concoguá López

Guatemala, 06 de Junio de 2017

Ingeniero

Roberto Guzmán Ortiz

Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Universidad de San Carlos de Guatemala

Presente.

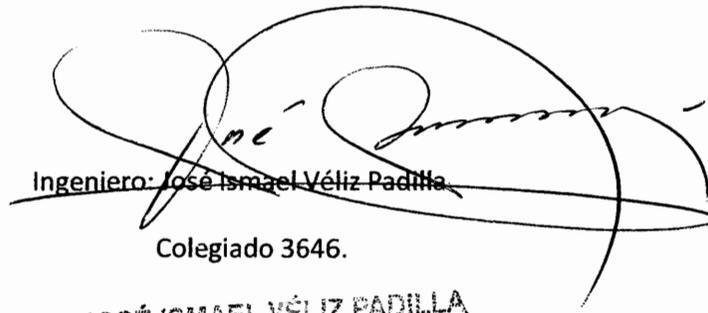
Señor Director:

Por medio de la presente me dirijo a usted para informarle que he llevado a cabo la revisión final del trabajo de graduación ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL presentado por el alumno Gustavo Alberto Concoquí López.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y los objetivos iniciales planteados y considero que llena los requisitos académicos para ser aprobado como trabajo de graduación.

Agradeciendo la atención a la presente aprovecho la oportunidad para suscribirme de usted.

Atentamente.



Ingeniero: José Ismael Véliz Padilla

Colegiado 3646.

JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA
INGENIERO MECÁNICO
COL: 3646



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.199.2017

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL** desarrollado por el estudiante **Gustavo Alberto Concoguá López**, CUI **2538034620114**, Registro Académico **200113437** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, julio 2017



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.313.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL** del estudiante **Gustavo Alberto Concoguá López**, **CUI 2538034620114**, **Registro Académico 200113437** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala noviembre de 2017

/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

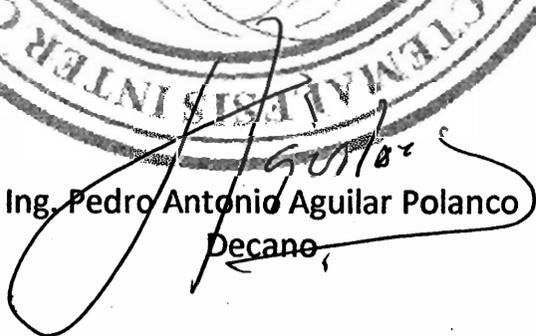


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 041.2018

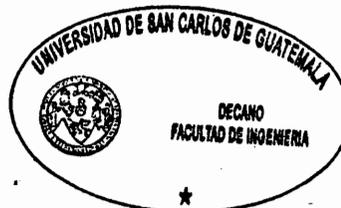
El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO DE REGULACIÓN DE TURBINA PELTON VERTICAL**, presentado por el estudiante universitario: **Gustavo Alberto Concoguá López**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque nada hubiera sido posible sin Su voluntad.
Mis padres	Por los sabios consejos en los momentos difíciles. Por la fuerza, recursos, paciencia, y sacrificios brindados en este proyecto.
Mi esposa	Por el acompañamiento en las noches en vela y el apoyo incondicional para alcanzar el objetivo propuesto.
Mi hermano	Por ser la inspiración para iniciarme en este recorrido.
Mis amigos	Por la amistad que nace de alcanzar metas conjuntas y cultivar el trabajo en equipo.
Mi familia	Por ser la base de mi formación.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por su sólida formación y mejora continua.

Facultad de Ingeniería

Por tener disponible todo el conocimiento necesario para encontrar la verdad.

Mi asesor

Por su asistencia, sugerencias y opiniones profesionales en el desarrollo de la etapa final de la carrera.

Catedráticos

Por darme los lineamientos para resolver los problemas didácticos y profesionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. DESCRIPCIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	1
1.1. Central hidroeléctrica	1
1.2. Características	2
1.3. Funcionamiento	4
1.4. Componentes de una central hidroeléctrica.....	6
1.4.1. Presas	8
1.4.2. Válvulas, compuertas y aliviaderos	9
1.4.3. Bocatoma	11
1.4.4. Canales, túneles y tuberías.....	12
1.4.5. Casa de máquinas	14
1.4.5.1. Turbinas hidráulicas.....	14
1.4.5.1.1. Turbinas de acción	16
1.4.5.1.1.1. Turbina Pelton	18
1.4.5.2. Generador	25
1.4.5.3. Línea de conexión y equipo eléctrico.....	26
1.5. Tipos de centrales hidroeléctricas.....	27
1.5.1. A filo de agua o de agua fluyente	30

1.5.2.	Con embalse.....	31
1.5.3.	De bombeo	33
1.6.	Papel del ingeniero mecánico en una central hidroeléctrica.....	35
2.	OLEODINÁMICA	39
2.1.	Aplicación de mecánica de fluidos en oleodinámica.....	39
2.1.1.	Principio de Pascal	41
2.1.2.	Ley de continuidad.....	45
2.1.3.	El principio de Bernoulli	46
2.1.4.	Índice de viscosidad.....	49
2.1.4.1.	Clasificación de viscosidad ISO	53
2.1.5.	Cavitación	55
2.1.6.	Golpe de ariete	57
2.1.7.	Flujo laminar y turbulento.....	59
2.2.	Unidad oleodinámica de presión.....	62
2.3.	Válvulas oleodinámicas	70
2.4.	Simbología oleodinámica.....	85
2.5.	Actuadores oleodinámicos.....	89
2.6.	Mantenimiento	91
2.6.1.	Objetivos del mantenimiento.....	92
2.6.2.	Tipos de mantenimiento.....	93
2.6.2.1.	Mantenimiento preventivo	95
2.6.2.2.	Mantenimiento correctivo	95
2.6.2.3.	Mantenimiento predictivo	97
2.6.3.	Proceso de mantenimiento	99
3.	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN OLEODINÁMICO DE TURBINA PELTON	101
3.1.	Funcionamiento del equipo para medición de velocidad	101

3.1.1.	Unidad de potencia oleodinámica	102
3.2.	Funcionamiento de la unidad de potencia oleodinámica.....	103
3.2.1.	Válvulas.....	105
3.2.1.1.	Compensación por presión para las válvulas reguladoras de caudal	106
3.2.1.2.	Compensación por temperatura para las válvulas reguladoras de caudal	107
3.2.2.	Cilindros oleodinámicos	109
3.2.3.	Instrumentación.....	109
3.3.	Funcionamiento de los inyectores y deflector	110
3.3.1.	Servoválvulas proporcionales	110
3.3.2.	Actuadores de los inyectores	113
3.4.	Funcionamiento de los inyectores.....	114
3.5.	Funcionamiento del deflector	116
3.6.	Funcionamiento del cierre de parada por protecciones	118
3.7.	Funcionamiento del inyector de frenado	120
3.8.	Funcionamiento de la válvula de derivación	122
3.9.	Funcionamiento de la válvula de guarda.....	124
3.10.	Funcionamiento de los frenos	127
3.11.	Funcionamiento del sello de mantenimiento	130
3.11.1.	Instrumentación.....	130
3.11.2.	Aplicación del sello de mantenimiento	133
3.11.3.	Desaplicación del sello de mantenimiento	134
3.12.	Funcionamiento del sello de operación.....	134
3.12.1.	Instrumentación.....	135
3.12.2.	Aplicación de sello de operación.....	138
3.12.3.	Desaplicación de sello de operación	139
4.	MANTENIMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO.....	141

4.1.	Enfoque actual del mantenimiento de las centrales hidroeléctricas.....	141
4.1.1.	Mantenimiento productivo total aplicado a centrales hidráulicas.....	144
4.1.1.1.	Procesos fundamentales o pilares para implementar mantenimiento productivo total	144
4.1.1.1.1.	Mejoras enfocadas.....	144
4.1.1.1.2.	Mantenimiento autónomo..	146
4.1.1.1.3.	Mantenimiento planificado o progresivo	146
4.1.1.1.4.	Mantenimiento de calidad .	148
4.1.1.1.5.	Prevención del mantenimiento	149
4.1.1.1.6.	Mantenimiento en áreas administrativas	149
4.1.1.1.7.	Entrenamiento y desarrollo de habilidades.....	150
4.1.1.1.8.	Seguridad, higiene y medio ambiente	151
4.2.	Técnicas de análisis de fallas	152
4.2.1.	Grafcet	155
4.2.2.	Análisis del modo y efecto de fallas.....	157
4.2.3.	Árboles de falla	160
4.2.4.	Análisis de Pareto	161
4.3.	Mantenimiento del equipo oleodinámico.....	162
4.3.1.	Circuitos oleodinámicos	163
4.3.2.	Lista de equipos.....	165
4.3.3.	Análisis operativo por medio de Grafcet	168

4.3.4.	Análisis de fallas por medio de árboles de falla	173
4.3.5.	Análisis por medio de modo y efecto de falla	177
4.3.6.	Análisis de Pareto	180
4.3.7.	Mantenimiento del equipo oleodinámico	184
4.3.8.	Mantenimiento predictivo del equipo oleodinámico	185
4.3.9.	Mantenimiento preventivo del equipo oleodinámico...	186
4.3.10.	Mantenimiento correctivo del equipo oleodinámico....	187
CONCLUSIONES		189
RECOMENDACIONES		191
BIBLIOGRAFÍA		193

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema del proceso energético.....	3
2.	Transformación de energía	5
3.	Central hidroeléctrica	7
4.	Turbina de acción.....	17
5.	Turbina Pelton.....	19
7.	Rodete de turbina Pelton.....	21
8.	Inyectores.....	22
9.	Deflectores	24
10.	Cámara de descarga.....	25
11.	Clases de centrales hidroeléctricas.....	28
12.	Central a filo de agua	31
13.	Central con embalse	33
14.	Central de bombeo.....	34
15.	Ingeniero Mecánico en una central hidroeléctrica	35
16.	Prensa hidráulica.....	44
17.	Representación gráfica de la Ley de continuidad.....	46
18.	Representación gráfica de Bernoulli.....	49
19.	Cavitación.....	56
20.	Golpe de ariete.....	58
21.	Tubería lisa régimen laminar	60
22.	Tubería lisa régimen turbulento.....	61
23.	Diagrama de Moody	62
24.	Acumulador	65

25.	Depósito.....	66
26.	Filtro.....	67
27.	Válvula reguladora de caudal.....	71
28.	Válvula antirretorno.....	72
29.	Válvula proporcional	73
30.	Válvula de control direccional	74
31.	Válvulas centrales abiertas y cerradas	75
32.	Válvula de control de presión.....	76
33.	Válvula de seguridad	77
34.	Válvula de alivio de acción directa	78
35.	Válvula de alivio diferencial.....	78
36.	Válvula de alivio operada por piloto	79
37.	Válvula reductora de presión	80
38.	Válvula de secuencia.....	81
39.	Válvula de secuencia con una válvula de <i>check</i> integral	82
40.	Válvula de descarga	83
41.	Válvula reguladora de presión de 2 vías	84
42.	Válvula reguladora de presión de 3 vías.....	85
43.	Cilindro de simple efecto.....	90
44.	Cilindro de doble efecto	91
45.	Objetivos del mantenimiento.....	93
46.	Tipos de mantenimiento.....	94
47.	Organización del mantenimiento predictivo	98
48.	Proceso de mantenimiento	99
49.	Lazo cerrado de control de velocidad de la turbina.....	102
50.	Circuito oleodinámico de la unidad de presión.....	104
51.	Compensación de presión por muelle.....	107
52.	Compensación de temperatura.....	108
53.	Cilindro oleodinámico del deflector	109

54.	Válvula proporcional utilizando un motor de fuerza lineal para accionar su carrete.....	113
55.	Inyector Pelton	114
56.	Circuito oleodinámico con dos inyectores	115
57.	Circuito oleodinámico del deflector.....	117
58.	Circuito oleodinámico de parada por protecciones.....	119
59.	Circuito oleodinámico del inyector de frenado.....	120
60.	Válvula oleodinámica tipo aguja del inyector de frenado.....	121
61.	Circuito oleodinámico de válvula de derivación.....	122
62.	Válvula de derivación tipo aguja sobre válvula de guarda.....	123
63.	Circuito oleodinámico de la válvula de guarda	125
64.	Válvula de guarda de retorno por contrapesos.....	126
65.	Circuito oleodinámico de frenos	128
66.	Cilindro oleodinámico de frenos.	129
67.	Válvula 4/2 vías con actuador manual de accionamiento del sello de mantenimiento.....	131
68.	Circuito oleodinámico del sello de mantenimiento.....	132
69.	Válvula 4/2 vías accionada por émbolo.....	133
70.	Sello de operación.....	134
71.	Válvula 4/2 vías con actuador hidráulico para aplicación del sello de operación.....	136
72.	Circuito oleodinámico del sello de operación	137
73.	Válvula 3/2 vías con actuador hidráulico	138
74.	Factores de confiabilidad operacional	143
75.	Ciclo de mejora enfocada aplicado a una hidroeléctrica	145
76.	Acciones del mantenimiento progresivo.....	147
77.	Ciclo de mantenimiento de calidad.....	148
78.	Acciones del mantenimiento en áreas administrativas.....	150
79.	Acciones para la seguridad, higiene y medio ambiente	151

80.	Clasificación de las fallas.....	153
81.	Tipos de falla según la técnica.....	154
82.	Circuitos oleodinámicos	164
83.	Secuencia operación	170
84.	Secuencia de parada.....	172
85.	Árbol de falla para arranque de bomba.....	174
86.	Árbol de falla para presión incorrecta de bomba.....	175
87.	Árbol de falla para el aceite del acumulador	176
88.	Gráfica de Pareto.....	183

TABLAS

Tabla I.	Grados de viscosidad ISO	54
Tabla II.	Norma para símbolos oleodinámicos	86
Tabla III.	Simbología oleodinámica	87
Tabla IV.	Símbolos utilizados en grafcet	156
Tabla V.	Gravedad del fallo	158
Tabla VI.	Probabilidad de ocurrencia	159
Tabla VII.	Probabilidad de no detección	159
Tabla VIII.	Formato análisis de modo y efecto de falla	160
Tabla IX.	Simbología de árboles de falla	161
Tabla X.	Partes y componentes de la unidad oleodinámica de alta presión	166
Tabla XI.	Nomenclatura de símbolos usados en grafcet	168
Tabla XII.	Análisis del modo y efecto de falla del sistema oleodinámico de regulación (primera parte)	178
Tabla XIII.	Análisis de Pareto para el sistema oleodinámico	181
Tabla XIV.	Análisis de la gráfica de Pareto	182
Tabla XV.	Programa de mantenimiento predictivo del equipo oleodinámico	185
Tabla XVI.	Programa de mantenimiento preventivo del equipo oleodinámico	186
Tabla XVII.	Programa de mantenimiento correctivo del equipo oleodinámico	187

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Asme	<i>American Society of Mechanical Engineers,</i> (sociedad americana de ingenieros mecánicos)
Awwa	<i>American Water Works Association,</i> (Asociación Americana del agua)
α	Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial
β	Ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad Tangencial
Bar	Unidad de presión, aproximadamente igual a una atmósfera
C	Velocidad absoluta
°C	Grado Celsius
cSt	Centistock
CV	Caballos de vapor
Din	Deutsches Institut für Normung, instituto alemán de normalización
°F	Grado Fahrenheit
G	Aceleración de la gravedad
gal	Galón
gal US	Galón americano
Gr	Grado de reacción
H_{est}	Altura estática o de presión
H_{tot}	Altura útil

Iso	<i>International Organization for Standardization,</i> organización internacional de normalización
L	Litro
M	Metro
mA	Miliamperio
Ms	Milisegundo
Min	Minuto
Mm	Milímetro
m/s	Metro por segundo
N	Velocidad de rotación de la máquina
kW	Kilovatios
P	Presión
Plc	Programmable Logic Controller, controlador lógico programable
V	Voltio
W	Watt

GLOSARIO

Aliviaderos	Estructuras de regulación y de protección que sirven para evacuar caudales de demasías o caudales superiores a los del diseño. Si estas aguas excedentes ingresarán a las diferentes obras que componen el sistema, podrían ocasionar daños de imprevisibles consecuencias.
Bocatoma	Las estructuras hidráulicas construidas sobre un río o canal con el objeto de captar, es decir, extraer una parte o la totalidad del caudal de la corriente principal.
Cangilones	Cada uno de los recipientes unidos a la turbina, que sirve para dar empuje a la máquina.
Central hidroeléctrica	Una central hidroeléctrica es una instalación que permite aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a los alternadores.
Cinética	Rama de la mecánica encargada de definir y calcular los atributos cinéticos de un sistema material arbitrario en un movimiento dado.

Clapeta	Elemento obturador utilizado en dispositivos hidráulicos, permite el cierre o apertura del paso de fluidos, puede ser accionado mecánica o hidráulicamente.
Compuerta	Nombre de un dispositivo hidráulico, mecánico, cuya función es la regulación del pasaje de agua o de cualquier otro fluido en tuberías, canales, presas, esclusas, obras de derivación, entre otras estructuras hidráulica.
Cuenca	Unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación se reúne y escurre a un punto común o que fluye toda al mismo río, lago o mar.
Electricidad	Conjunto de fenómenos producidos por el movimiento e interacción entre las cargas eléctricas positivas y negativas de los cuerpos físicos.
Energía cinética	La energía cinética de un objeto es aquella que se produce a causa de sus movimientos que depende de la masa y velocidad del mismo.
Energía hidráulica	La energía hidráulica es la producida por el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura (que posee energía potencial gravitatoria).
Energía mecánica	La energía mecánica es la producida por fuerzas de tipo mecánico, como la elasticidad, la gravitación y

otros y la poseen los cuerpos por el hecho de moverse o de encontrarse desplazados de su posición de equilibrio.

Energía potencial

La energía potencial es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo de acuerdo a la configuración que ostente en el sistema de cuerpos que ejercen fuerzas entre sí.

Hidráulica

El término proviene del griego Hydor que significa agua, y el concepto aún desde sus inicios, es el de la utilización del agua como medio para transformar la energía ya sea esta potencial y cinética en energía mecánica la que a su vez puede transformarse en trabajo.

Ley de Pascal

La presión que ejerce un líquido en un recipiente cerrado, se transmite en todas direcciones y de forma perpendicular a la superficie independientemente de la forma del recipiente.

Oleodinámica

En las aplicaciones industriales, la utilización de la potencia hidráulica, es mejor conocida con el nombre de Oleo hidráulica. Hace referencia directa al movimiento de un flujo pero en este caso un aceite.

Presa

Cumple la función de garantizar que la construcción este estable, pues soporta un empuje hidrostático de agua fuerte y no permite que el agua se filtre hacia

abajo.

Presión

Fuerza que actúa sobre una determinada área.

Presión atmosférica

Es el peso que ejerce el aire de la atmósfera como consecuencia de la gravedad sobre la superficie terrestre o sobre una de sus capas de aire.

Turbina Pelton

Una de las turbinas más conocidas de los ingenieros, son utilizadas para aquellas condiciones en la que se tiene una altura elevada (salto alto) y un caudal reducido, lo que la hace ideal para aplicaciones de pequeñas hidroeléctricas.

Válvula

Se utilizan para regular presión, caudal, y para direccionar fluidos.

RESUMEN

El propósito del presente trabajo de investigación es brindar información técnica del funcionamiento, no solo de las partes sino también de los equipos en conjunto, para determinar cómo interactúan. Se propone el tema denominado Análisis de funcionamiento del sistema oleodinámico de regulación de turbina Pelton vertical, ya que este equipo, a pesar de ser completamente automatizado, puede ser operado en el modo manual o en el automático. Por esta razón, es necesario conocer, de forma general, las indicaciones más importantes que se deben observar en cada elemento. Esta información es fundamental para el departamento de operaciones y para el de mantenimiento de la central hidroeléctrica.

Además, se considera que este material servirá para que el lector actualice e incremente sus conocimientos sobre especificaciones y detalles técnicos de los equipos pero, sobre todo, a determinar cómo se relacionan unos y otros. Actualmente, la mayoría de la bibliografía sobre el tema son generalidades y no profundizan en explicaciones detalladas de los sistemas y de los componentes. Además, actualmente en Guatemala, la matriz energética está conformada por el 65,92% de energía renovable. Las hidroeléctricas ocupan el 26% del total. Por esta razón es esencial conocer a fondo esta tecnología si se cuenta con bibliografía suficiente para quien desee profundizar dicho tema.

Para la elaboración del presente proyecto se realizará una investigación sobre información que refiere al planteamiento del problema por medio de manuales, instructivos, internet, libros, entre otros. En virtud de que se tiene

acceso a una de las centrales donde se encuentra instalada una turbina Pelton, la adquisición de información se facilita. Sin embargo, no es posible publicar información confidencial y material con propiedad intelectual clasificada.

Uno de los objetivos es describir el funcionamiento y fallas presentadas en la regulación de una turbina Pelton, por esta razón, se aportará información técnica obtenida en campo, como fundamentos técnicos de la práctica para la solución de problemas.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis técnico del funcionamiento del equipo oleodinámico del sistema de regulación de una turbina Peltonvertical.

Específicos

1. Definir la aplicabilidad y alcance de la oleodinámica industrial de un sistema de regulación de una turbina de una central hidroeléctrica.
2. Analizar los elementos oleodinámicos principales del sistema de regulación de una turbina y de su interrelación.
3. Describir la operación del sistema de sellos de la válvula esférica y su relación con el sistema de aceite de regulación oleodinámico.
4. Describir las fallas más comunes de los equipos oleodinámicos del sistema de regulación de una turbina.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el ser humano se vale, ante todo, de la energía eléctrica, que posibilita el funcionamiento y el dinamismo de su entorno físico. Actualmente, existen muchas formas de generar energía eléctrica, donde la eficiencia energética juega un papel esencial para cuidar los recursos, que son muy valiosos y a la vez escasos. Por ello, se debe dar prioridad al uso de centrales eficientes y renovables, como las hidro eléctricas, que aprovechan la energía cinética de las aguas.

El elemento principal de las centrales hidroeléctricas es una turbina hidráulica capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica, mediante la absorción de energía del fluido de trabajo. Pertenecen a las turbo máquinas motrices dinámicas o cinéticas.

Los componentes del equipo oleodinámico de regulación de la turbina es el objeto de este estudio. Se tratará de manera general el regulador electrónico de velocidad y el equipo para la medición de velocidad. Se hace énfasis en el detalle funcional del equipo oleodinámico, mando de los inyectores, deflector, válvula de guarda, válvula de derivación de válvula esférica y finalmente los frenos.

Se describirá también la operación del sistema de sellos de la válvula de guarda porque lo controla el sistema oleodinámico de la turbina. La importancia de los sellos de operación y mantenimiento radica en que solo pueden ser aplicados o desaplicados, según condiciones controladas de la válvula de guarda.

Las centrales hidroeléctricas tienden a tener vidas económicas más largas que las plantas eléctricas que utilizan combustibles. Los costos de operación son bajos porque las plantas están automatizadas e intervienen pocas personas durante la operación normal. Esto beneficia la salud y el medio ambiente, pues es energía verde.

1. DESCRIPCIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

1.1. Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica utiliza la energía hidráulica que ha sido aprovechada con la caída de agua desde cierta altura, donde la energía potencial, por efecto de la acción de la gravedad se convierte en energía cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que, finalmente se transforma en energía eléctrica por medio de un generador.

Es decir que una central hidroeléctrica es una instalación que genera electricidad por medio del aprovechamiento de la energía potencial del agua, embalsada en una presa o recolectada en tanques de carga situados a un nivel más alto que la central. En otras ocasiones, puede ser que provenga directamente del cauce de un río sin necesidad de ser embalsada. El primer tipo de hidroeléctrica se denomina central con embalse, mientras que la segunda se denomina una central a filo de agua.

En otras palabras, se genera electricidad liberando un flujo controlado de agua a alta presión, a través de un conducto forzado desde la presa hasta la sala de máquinas. El agua impulsa unas turbinas que mueven los generadores y, así producen una corriente eléctrica, esta corriente elevada de baja tensión, pasa por transformadores elevadores de tensión, que la convierten en corriente reducida de alta tensión. La corriente se transporta por cables de alta tensión hasta las subestaciones eléctricas, donde se reduce la tensión, para ser utilizada por los usuarios.

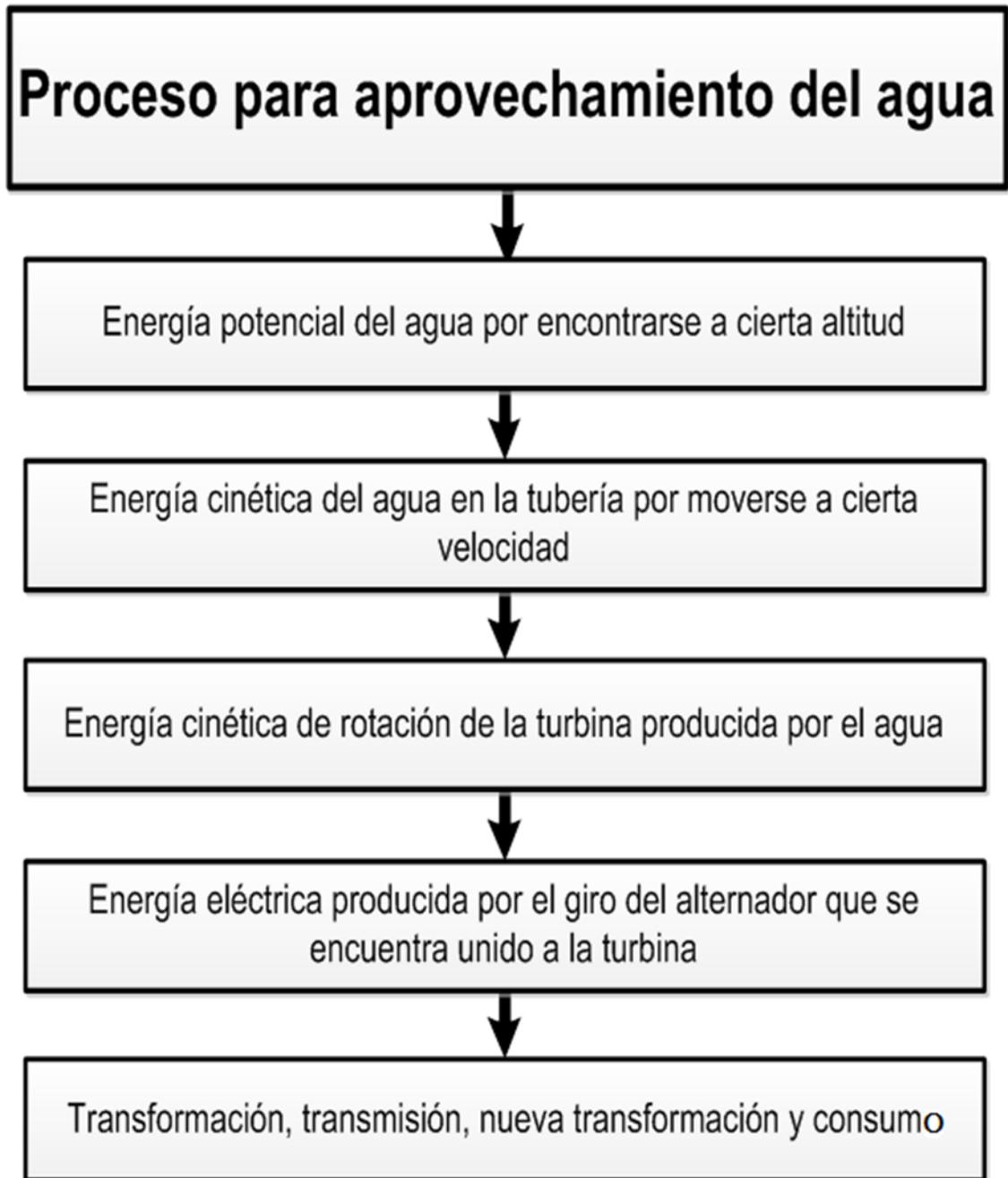
1.2. Características

Entre las características que posee una central hidroeléctrica en funcionamiento y operatividad, se pueden identificar las siguientes:

- Requiere de recursos hídricos suficientes para un funcionamiento óptimo, ya que es utilizado para elevación y abastecimiento de agua en central hidroeléctrica.
- Posee una conexión a una fuente de agua que tenga cierto desnivel topográfico entre el espejo de agua y el ariete que le permita operar adecuadamente a la central hidroeléctrica.
- Su consumo depende de la cantidad de caída de agua disponible, el salto, la velocidad de las válvulas, la magnitud del peso y la presión del agua.
- Según el caudal de aporte de agua y el salto disponible, se puede determinar el tipo de turbina que se utilizará, tomando también en cuenta otras variables como la eficiencia de la turbina, del acoplamiento, del generador, condiciones geográficas, entre otros.
- Aprovecha la energía potencial convertida en cinética al descender agua por efecto de gravedad por la tubería de presión. Siendo esta energía cinética del agua, la que proporciona la fuerza motriz a la turbina.

En la siguiente figura se desglosan los elementos del proceso energético para el aprovechamiento del agua, utilizando la energía potencial, la energía cinética y la energía eléctrica. Este proceso finaliza con la transformación, transmisión, nueva transformación y consumo del agua.

Figura 1. Esquema del proceso energético



Fuente: elaboración propia.

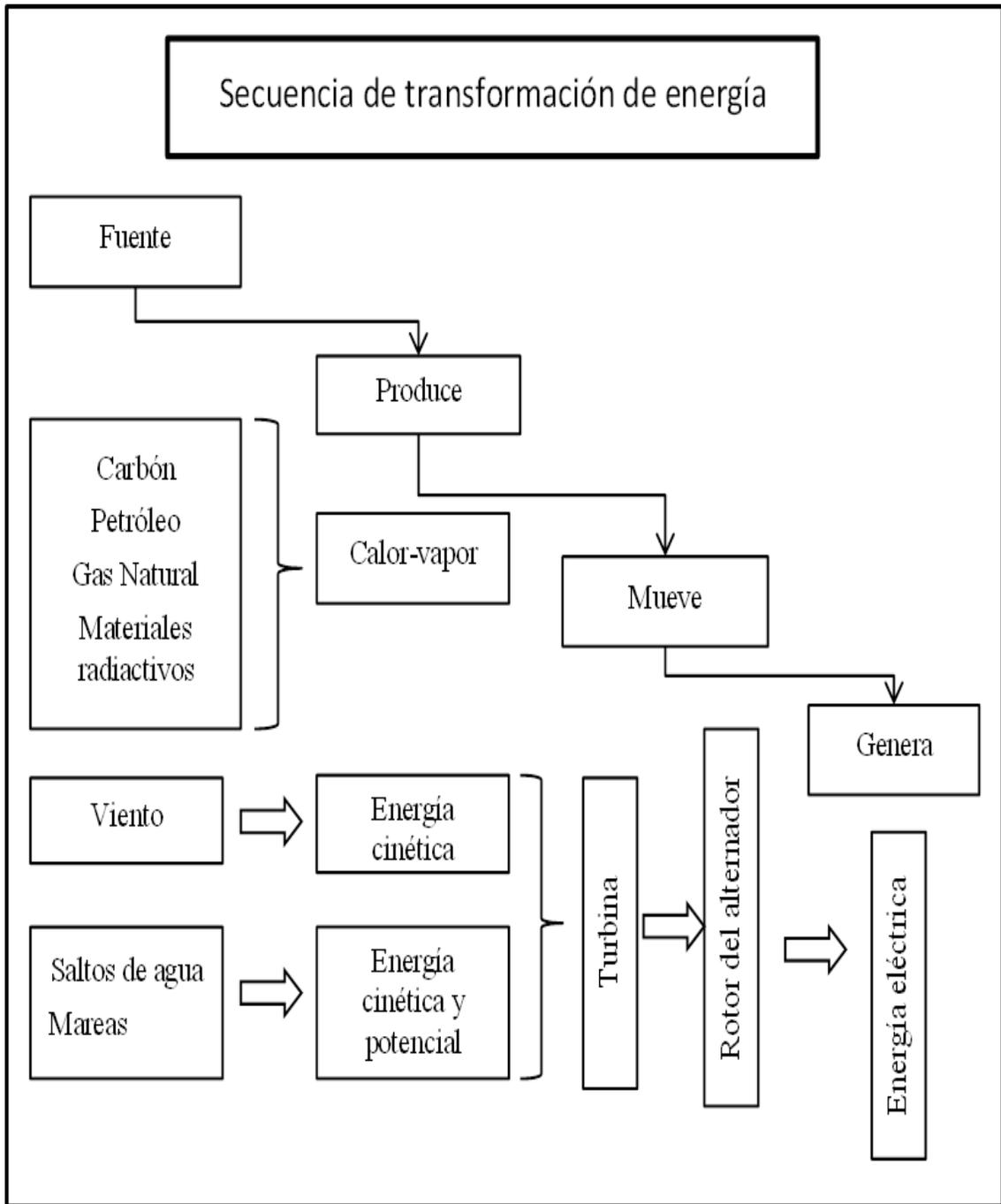
1.3. Funcionamiento

Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía mecánica que proporciona el desplazamiento del agua para generar energía eléctrica, la contaminación que se genera en las centrales hidroeléctricas es relativamente baja. La energía potencial de un objeto es mayor cuando se encuentra a una altura mayor. Por ello, para caídas de agua bastante grandes se puede generar cantidades grandes de energía eléctrica.

Las funciones de las centrales hidroeléctricas son complejas, ya que cuentan con diferentes elementos para lograr aprovechar la energía mecánica producida por el desplazamiento del agua y poder utilizarla para generar energía eléctrica.

En la siguiente figura, se visualiza el proceso de secuencia de transformación de energía, formada por cinco pasos, iniciando con la fuente formada de carbón, petróleo, gas natural, viento y saltos de agua, el segundo paso genera el calor, vapor, movimiento y fuerza viva, tercer paso produce a través de una turbina, el cuarto es el movimiento y por último lo que genera la energía eléctrica.

Figura 2. Transformación de energía



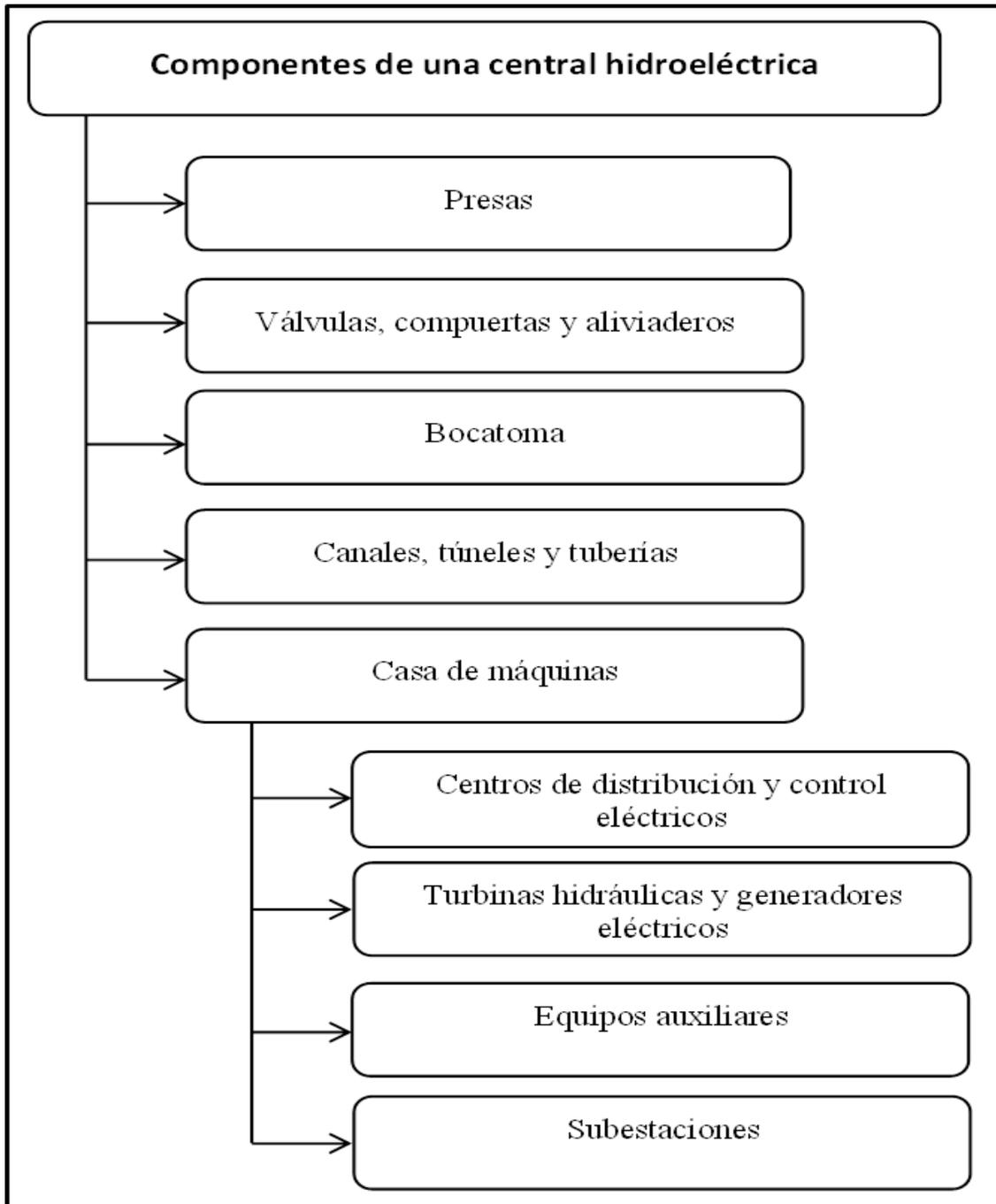
Fuente: elaboración propia.

1.4. Componentes de una central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica se compone de elementos, como la presa, que a su vez requiere válvulas, compuertas, aliviaderos, bocatoma, canales, túneles, tuberías, la casa de máquinas, donde se encuentran ubicadas las turbinas hidráulicas, turbinas de acción, turbinas de reacción y su respectivo generador de línea de conexión y equipo de fluido.

En la siguiente figura se pueden observar, los componentes de una central hidroeléctrica que son las presas, válvulas, compuertas, aliviaderos, bocatoma, canales, túneles, tuberías y, por último, la casa de máquinas la cual, a su vez tiene tres factores, las turbinas hidráulicas que se componen de las turbinas de acción y las turbinas de reacción. La casa de máquinas también incluye el generador y la línea de conexión y equipo eléctrico.

Figura 3. Central hidroeléctrica



Fuente: elaboración propia.

1.4.1. Presas

En una central hidroeléctrica la presa representa el elemento indispensable que cumple la función de detener el río y estancar sus aguas. Con estas construcciones se logra un determinado nivel del agua antes de la contención y otro nivel diferente después de la misma. Ese desnivel se aprovecha para producir energía.

Lo que significa que la presa se produce cuando se bloquea el cauce de ríos o manantiales, para extraer la mayor cantidad de agua de ellos. Esto es necesario cuando se requiere generar gran potencia en hidroeléctricas grandes y almacenar el agua para el verano.

Son los embalses destinados a usos hidroeléctricos u otros fines y en los que se pueden regular las aguas a través de un depósito de regulación diario, semanal o mensual. Las centrales de flujo regulado están situadas debajo de las aguas. La entidad de la regulación está relacionada a la capacidad de acumulación del depósito.

Es importante resaltar que, aunque estos sistemas son de gran tamaño y de efectos significativos en las áreas donde se construyen, la ley de electricidad da lugar a la proliferación de estas. El gobierno de Guatemala las promueve y se otorgan incentivos por generar energía eléctrica con recursos renovables, siempre y cuando no se dañe al medio ambiente ni a las personas.

1.4.2. Válvulas, compuertas y aliviaderos

Son dispositivos indispensables en una hidroeléctrica, operan en posición abierta y cerrada, según sea el requerimiento de la hidroeléctrica. En algunas ocasiones son utilizadas para la regulación del caudal de agua.

Las válvulas se consideran accesorios que se utilizan en las redes de distribución para controlar el flujo. Se pueden clasificar en función de la acción específica que realizan. Las válvulas más comunes en una red de distribución son las de compuerta y sirven para aislar segmentos de la misma.

También son necesarias para el control del paso del agua desde el embalse o el punto de toma hasta el cauce del río aguas abajo. En una central hidroeléctrica se debe disponer de dispositivos de control del flujo de agua, para evitar el peligro que podrían ocasionar las crecidas. Estas pueden provocar una subida del nivel del agua en el embalse que sobrepase el máximo permitido. Para estos casos, es necesario evacuar el agua excedente impidiendo su paso por la central. Para ello, se utilizan las compuertas y válvulas, los cuales son elementos indispensables que permiten regular y controlar los niveles del embalse.

Las compuertas en las hidroeléctricas están instaladas en la entrada de los conductos de toma y a la salida del tubo de aspiración para evitar el contra flujo que va a la turbina. Se instalan para darle seguridad y fácil mantenimiento al sistema. Las compuertas son de madera o, en otras ocasiones, de acero y se manipulan mecánicamente por medio de una cremallera o de una caja reductora de presión para bajar o para subir.

Existen varios tipos de compuertas, pero la más utilizada es la tipo guillotina que se movilizan de arriba para abajo y viceversa, en un canal diseñado específicamente para ello, lubricado especialmente. Tienen con volante de operación manual que también se mueve en forma normal, por medio de mecanismos automatizados. Su torno debe contar con suficiente torque y potencia para hacer el trabajo bajo presión. Se acciona desde los controles de la casa de máquinas por control electrónico a distancia.

Los aliviaderos tienen como propósito liberar parte del agua contenida, sin que pase por la sala de máquinas. Se encuentran en la pared principal de la presa y pueden ser de fondo o de superficie. Generalmente disponen de diferentes tipos de compuertas que permiten mantener totalmente cerrado el paso del agua, parcialmente abierto o abierto total. Entre ellos, se pueden mencionar las compuertas verticales en las cuales el elemento de chapa reforzada se sube y baja verticalmente guiado por unas ranuras en los pilares adyacentes.

Además, se tienen las compuertas de segmento o compuertas Taintor. Consisten en una estructura metálica con una superficie en forma cilíndrica que gira alrededor de un eje al que está unido a través de brazos radiales. Por último, se menciona la clapeta como la compuerta basculante alrededor de un eje que vierte por encima de la misma. Un aliviadero se crea para liberar, si es necesario, grandes cantidades de agua o atender necesidades de riego. Para evitar que el agua pueda producir catástrofes al caer desde gran altura, los aliviaderos se diseñan para que la mayoría del líquido se pierda en una cuenca que se ubica al pie de la presa, llamada de amortiguación.

Para que el agua salga por los aliviaderos existen grandes compuertas, de acero que se pueden abrir o cerrar dependiendo de la necesidad o la demanda de la situación.

1.4.3. Bocatoma

La bocatoma permite colocar una rejilla de entrada y la estructura de conducción que lleva el agua a las turbinas y desfogue de fondo que limpia y evacúa sedimentos. Es decir que la bocatoma sirve para que la presa realice su mantenimiento mínimo, ya que en épocas de grandes lluvias, los ríos traen consigo piedras, arena, vegetación y, por consiguiente, estos materiales pueden bloquear la entrada de agua al canal, por lo que estos residuos deben retirarse de la bocatoma.

Las bocatomas se fabrican de concreto reforzado con hierro. Su diseño estructural está pensado para soportar cargas de presión hidrostática y de presión dinámica del movimiento del caudal del río. La bocatoma también alberga las compuertas tipo guillotina.

El torque de las compuertas, accionado con motor eléctrico, se debe alimentar con energía proveniente de la central propiamente dicha y de la planta de emergencia accionada a combustible diésel, instalada en la casa de máquinas. Debe incluir controles que se manejen por interruptores en el cambio automático de energía e incluso, en caso de emergencia, en forma manual por volante.

1.4.4. Canales, túneles y tuberías

Canales: son estructuras fabricadas a base de concreto y transportan el flujo de agua que sigue una trayectoria forzada del río. De esta manera se mantiene la elevación del agua de la presa para las diferentes áreas de la hidroeléctrica.

Tienen diferentes longitudes, de preferencia ancho constante y se puede utilizar para diversas profundidades en las centrales hidroeléctricas.

Los canales alimentan de agua a las turbinas y se puede hacer directamente a través del dique en centrales a pie de presa o a través de un sistema de canalizaciones en el caso de centrales en derivación.

Los canales pueden construirse excavando el terreno en la ladera o de forma artificial mediante estructuras de concreto. En todo caso las pendientes de los mismos son muy débiles. En los canales deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones.

Para ubicarla se debe buscar un lugar adecuado que represente mayor economía en la construcción de la hidroeléctrica y en su explotación. Se debe evitar el paso por terrenos permeables para reducir al mínimo los revestimientos de arcilla, mampostería u otros materiales. La velocidad del agua en los canales se establece cuando se determina su ubicación.

La sección rectangular del canal se construye en terreno rocoso y para canales en tierra se utiliza la sección trapezoidal. También se suelen utilizar tuberías prefabricadas de concreto para conducciones en lámina libre enterradas.

En algunas ocasiones, para reducir la longitud del canal, pueden perforarse túneles en la montaña, en cuyo caso, los puntos de ataque y de apoyo deben fijarse con exactitud para no elevar demasiado los costos de los trabajos de excavación y revestimiento, si es necesario. Los túneles son conducciones bajo tierra que se excavan en el terreno y aunque tienen un coste más elevado, se adaptan mejor al terreno y no quedan los objetos expuestos a cualquier daño por estar en la intemperie. El túnel suele ser de superficie libre y funciona como un canal abierto, es decir, que el agua no circula bajo presión.

La tubería se encarga de llevar el agua desde la cámara de carga hasta cada rincón de la hidroeléctrica. Debe estar diseñada para soportar la presión que produce la columna de agua, además de considerar la sobre presión que provoca el golpe de ariete en el caso de un rechazo de carga por parte de la central.

La colocación o ubicación de la tubería puede ser enterrada o expuesta dependiendo de las necesidades de la hidroeléctrica o la topografía del terreno y de los factores medioambientales. Las tuberías se emplean en las conducciones bajo tierra y si no son del tipo de superficie libre, el agua estará sometida a presión. Cuando la presión interna es muy alta, se debe incluir un armazón metálico externo como refuerzo para dicho túnel.

1.4.5. Casa de máquinas

Es un recinto donde se sitúa el equipo de la central hidroeléctrica de generación llamada casa de máquinas donde se encuentran, generalmente, turbinas, generadores, paneles de control y mando, válvulas de regulación, sistema de enfriamiento, ventiladores, reguladores de velocidad, equipos de protección, transformadores de medición, disyuntores, transformadores de diferentes tipos, generalmente se encuentra la bodega de repuestos y la sala de control.

Debe analizarse su ubicación por medio de estudios topográficos, geológicos y geotécnicos y la accesibilidad del mismo. La casa de máquinas debe contar con las conducciones necesarias para que el agua llegue hasta la turbina con las menores pérdidas de carga posible, además de contemplar el desagüe hacia el canal de descarga.

Dentro de la casa de máquinas se deben incluir los elementos necesarios para brindar seguridad a las turbinas y otros equipos de la central al momento de presentarse cualquier eventualidad inesperada.

1.4.5.1. Turbinas hidráulicas

Es una turbomáquina, en la cual el trabajo mecánico proviene de la variación de la cantidad de movimiento del agua al fluir a través de un sistema de álabes rotativos. En este sistema, denominado rodete, puede ocurrir una simple desviación del flujo de agua o, en otros casos una desviación y una aceleración de este flujo.

Una turbina hidráulica se compone principalmente por una parte fija llamada distribuidora. Cumple la función mecánica de dirección y regulación del caudal que llega al rodete y la función hidráulica de transformación de la energía potencial de agua en energía cinética. Además, incluye una parte móvil denominada rodete. El agua que sale del distribuidor lo pone en movimiento para comunicar energía mecánica al eje en el que está montada.

De acuerdo con sus características dinámicas, las turbinas se pueden clasificar como turbinas de acción cuando la energía potencial se transforma en energía cinética, mediante un chorro de gran velocidad, que es proyectado contra los cangilones, fijos en la periferia de un disco.

Las turbinas de reacción son aquellas en las que presión del agua actúa directamente sobre los álabes del rodete, disminuyendo de valor a medida que avanza en su recorrido, al estar el rodete completamente sumergido y sometido a la presión del agua. El elemento básico de la turbina es el rodete o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar.

La turbina hidráulica es fundamental para el proceso de transformación de energía hidráulica en energía mecánica se consigue mediante esta turbina, la cual utiliza la energía cinética y potencial de un fluido incompresible, como el agua, para producir un movimiento de rotación al rodete.

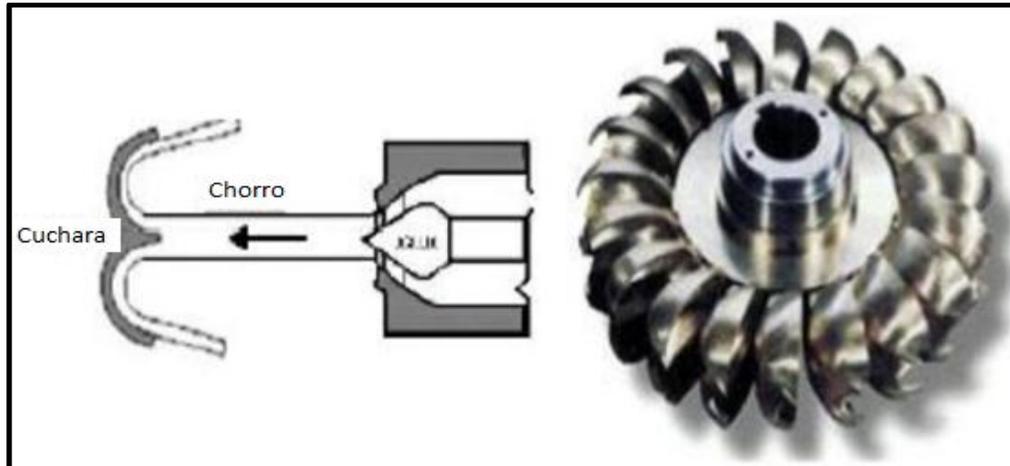
1.4.5.1.1. Turbinas de acción

La turbina de acción es la que aprovecha únicamente la velocidad del agua, es decir, su energía cinética. El modelo más habitual es la turbina Pelton, que consta de un disco circular o rodete que tiene montados unos cangilones o cucharas de doble cuenca. Estas turbinas son muy utilizadas porque pueden utilizarse con una altura mayor de 50 metros.

Este tipo de turbina puede instalarse en eje horizontal con 1 o 2 inyectores y con el eje vertical con 3 o 6 inyectores. Se emplea en pequeñas y grandes centrales hidroeléctricas. Un inyector consta, por lo general, de una tobera de sección circular provista de una aguja de la sección del flujo. Para interrumpir el flujo se tiene una placa deflectora, e incluso para reducir los golpes de ariete.

En las turbinas pequeñas que se utilizan en las micro centrales hidroeléctricas se puede prescindir de la aguja y operar con una o más toberas con caudal constante. En algunos casos se mantiene la placa deflectora regulación que se mueve axialmente, variando la sección del flujo. Para interrumpir el flujo se tiene una placa deflectora.

Figura 4. Turbina de acción



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.termotech.com. Consulta: diciembre de 2016.

Las turbinas de acción poseen las siguientes características:

- El grado de reacción es equivalente.
- Trabajan a presión atmosférica.
- El distribuidor es llamado inyector en estas turbinas.
- En el inyector se transforma la energía de presión del fluido en energía cinética del chorro.
- Carecen de tubo de aspiración.
- Son de admisión parcial.
- En la parte superior y en la parte inferior del rodete existe la misma presión, que es generalmente la presión atmosférica.
- El agua, al entrar en el rodete, tiene únicamente energía cinética.
- Se aprovecha por regla general solamente altura dinámica.
- Se utilizará esta clase de turbinas en los grandes saltos, ya que en estos la altura perdida resulta de muy escasa importancia.

1.4.5.1.1.1. Turbina Pelton

El nombre de la turbina Pelton se debe al ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, quien durante la segunda mitad del siglo XIX, la aplicó en instalaciones donde la presión del agua era equivalente a una columna de agua de entre noventa y novecientos metros. Lester A. Pelton, EEUU, inventó este tipo de turbina entre 1829 - 1908 y la patentó en 1880. Básicamente esta turbina es de flujo tangencial y admisión parcial, consta de un disco provisto de una serie de cangilones montados en la periferia. Los cangilones pueden estar empernados al disco, unidos por soldadura o fundidos en una sola pieza con el disco.

En este tipo de turbinas el agua se conduce desde un depósito a gran altura a través de un canal o una conducción forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión. Dado que la acción de la rueda Pelton depende del impulso del chorro sobre ella, en lugar de la reacción del agua en expansión.

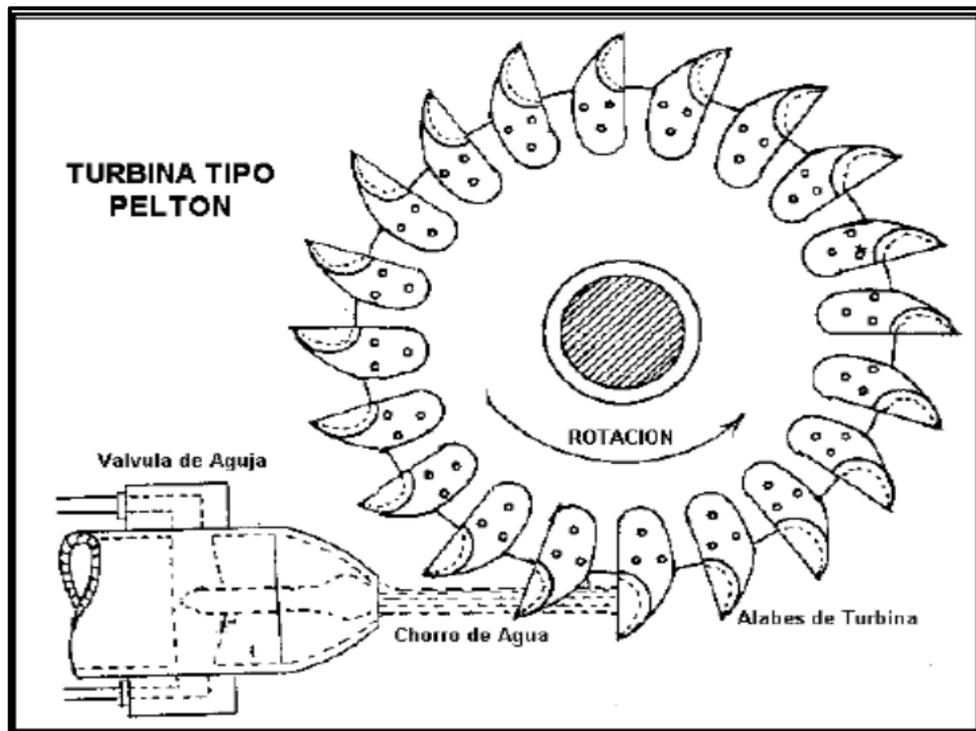
El principio de la antigua rueda hidráulica es sintetizado en la moderna rueda Pelton que consiste en una rueda provista de paletas en forma de cucharas alrededor de la periferia. La turbina Pelton pertenece al grupo de turbinas de impulso o chorro libre, donde la altura disponible se convierte en energía cinética a presión atmosférica. La energía se extrae del chorro de agua de alta velocidad cuando incide sobre la cuchara del rotor. Este tipo de turbina se aplica normalmente al rango de grandes alturas de caída, más de 40 metros.

Desde el punto de vista del diseño, existe adaptabilidad para diferentes caudales y alturas. La turbina Pelton puede estar equipada con una, dos o más toberas para mayores salidas. En la fabricación se usa comúnmente la

fundición para el rotor, siendo los materiales, acero o bronce. Esto requiere una infraestructura industrial apropiada. Un chorro de agua de alta velocidad emerge de una tobera incidiendo en los cangilones y poniendo la rueda en movimiento.

La velocidad de rotación está determinada por la magnitud de caudal y la velocidad del agua es controlada por medio de una aguja en la tobera, la turbina funciona más eficientemente cuando la rueda gira a un medio de la velocidad del chorro.

Figura 5. **Turbina Pelton**



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.termotech.com. Consulta: diciembre de 2016.

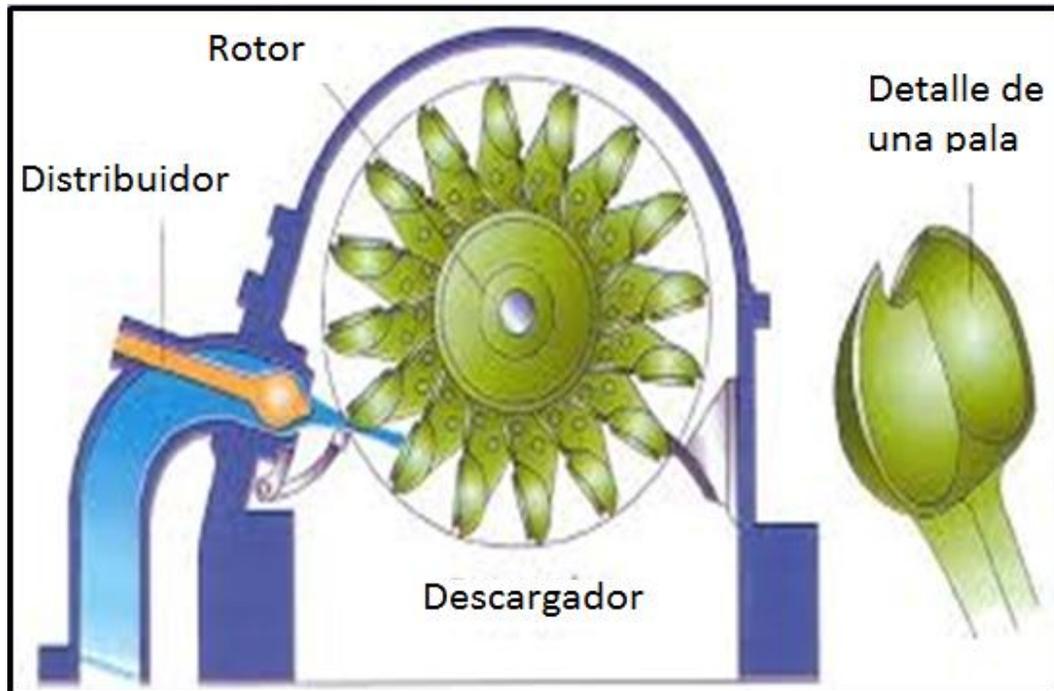
Si la carga en la rueda disminuye súbitamente, el deflector de chorro desvía parcialmente el chorro que proviene de la tobera hasta que la aguja ha reducido adecuadamente el caudal.

Este arreglo es necesario debido a que, si en la eventualidad de una disminución súbita de la carga, la aguja fuera cerrada rápidamente, el flujo de agua se reducirá demasiado abruptamente, causando fenómeno el dañino del golpe de ariete en el sistema hidráulico. En la mayoría de los casos, el control del deflector se conecta a un generador eléctrico.

Los componentes principales de una turbina Pelton son:

- Distribuidor de la turbina Pelton. Está compuesto por la cámara de distribución propiamente dicha y los inyectores que, a su vez, se conforman de servomotores, tobera, válvulas de agujas, deflectores y dispositivos mecánicos para su accionamiento. Su función es direccionar el chorro de agua hacia el rodete y regular la cantidad de agua incidente sobre el mismo. El número de chorros dispuestos circunferencialmente alrededor del rodete depende de la potencia y características del diseño. Se instalan hasta seis chorros.

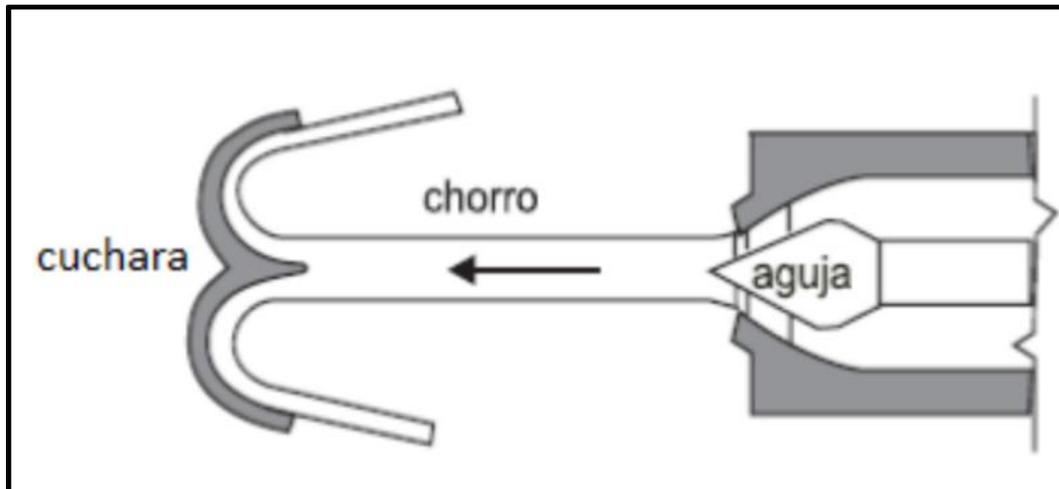
Figura 6. **Distribuidor de la turbina Pelton**



Fuente: *Textos científicos*. www.areatecnologia.com. Consulta: diciembre de 2016.

- Rodete de turbina Pelton. El rodete consiste en un disco de acero con álabes o cucharas periféricas en forma de doble cuchara. Donde el flujo impacta fuertemente al rodete estas se encargan de cambiar la dirección del agua mediante el impacto del chorro en la arista media, donde se divide en dos circula por el ábalo y a su vez transmite la energía al rodete. Luego de pasar por las cucharas, el agua sale con una velocidad mínima residual.

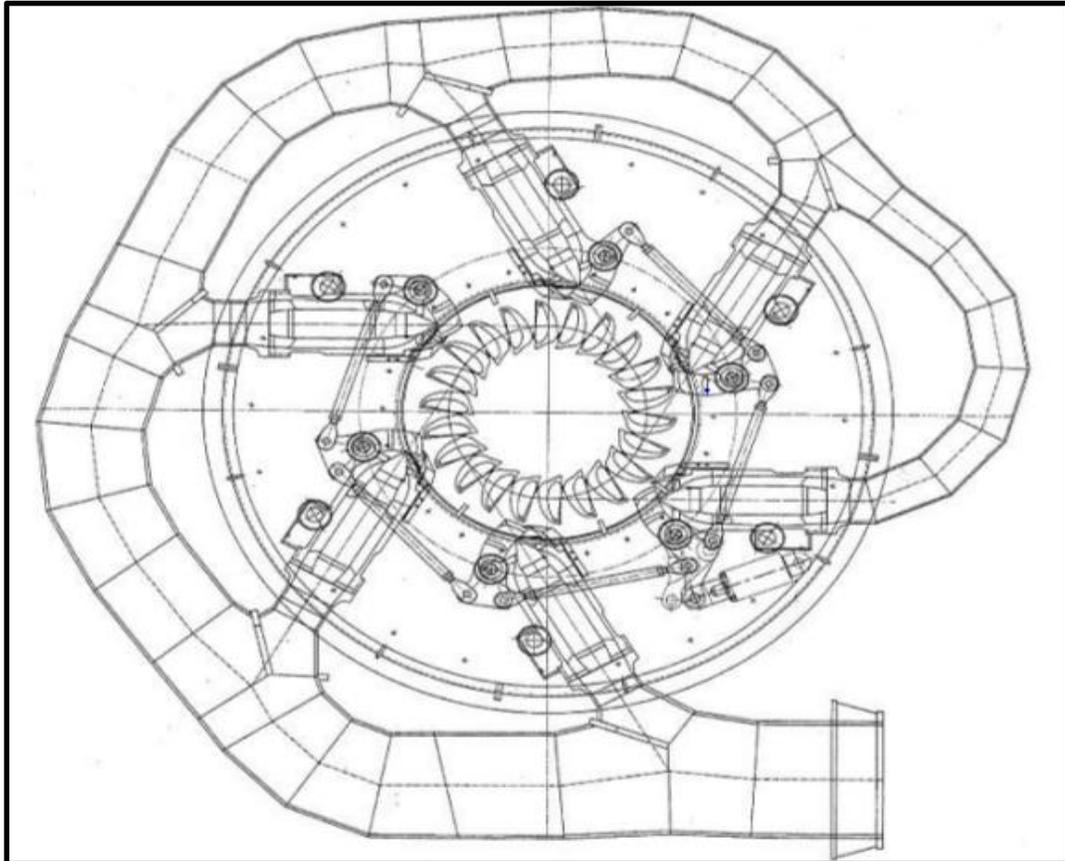
Figura 7. Rodete de turbina Pelton



Fuente: *Textos científicos* .www.areatecnologia.com. Consulta: diciembre de 2016.

- Inyectores: son los que aplican el chorro de agua a gran presión sobre el rodete de la turbina para hacerla girar. Las turbinas Pelton pueden utilizar uno o múltiples inyectores y cada inyector puede regular el flujo de agua. Esta característica le da una gran ventaja a las turbinas Pelton en casos donde no se puede predecir el flujo o cambia su caudal con frecuencia durante el año. La siguiente figura se muestra el esquema de una turbina Pelton de 6 inyectores.

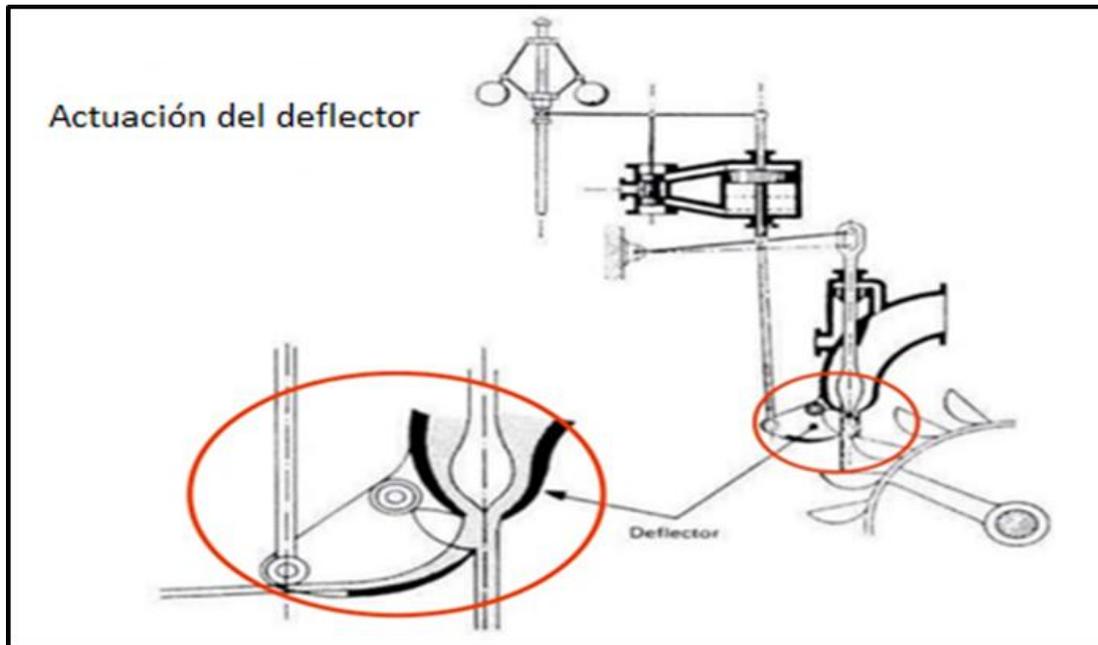
Figura 8. **Inyectores**



Fuente: *Textos científicos*. www.areatecnologia.com. Consulta: diciembre de 2016.

- Deflectores. Son dispositivos mecánicos que, a modo de pala o pantalla, puede ser intercalado con mayor o menor incidencia en la trayectoria del chorro de agua, entre la tobera y el rodete. Sirve para evitar el embalamiento y el golpe de ariete. Su función principal es interrumpir el chorro de agua de forma súbita en caso de un paro de emergencia de la unidad, aún antes que se cierren los inyectores.

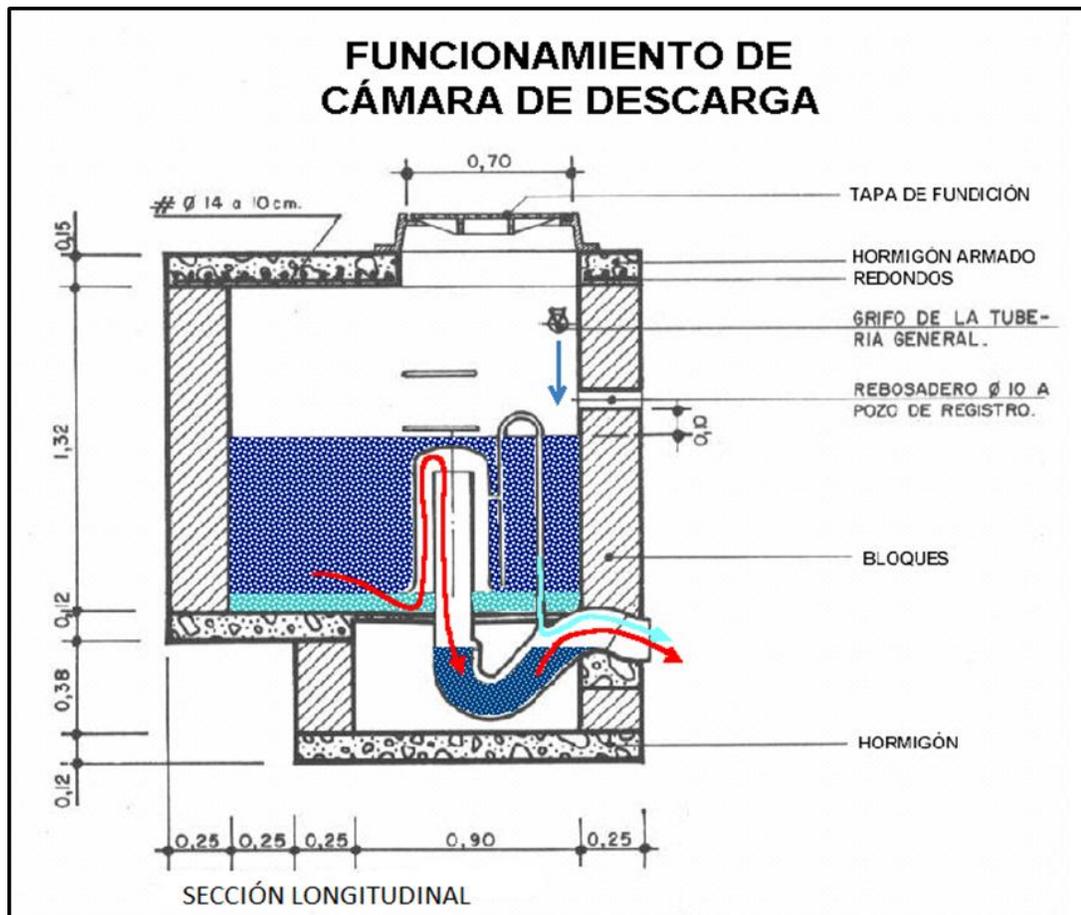
Figura 9. Deflectores



Fuente: AGÜERA, José. *Turbinas hidráulicas*. www.es.slideshare.net. Consulta: diciembre de 2016.

- Cámara de descarga. Es la zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüe, después de haber movido al rodete. También se conoce como tubería de descarga. Para evitar deterioros por la acción de los chorros de agua, especialmente de los originados por la intervención del deflector, se suele disponer en el fondo de la cámara de descarga de un colchón de agua de 2 a 3 metros de espesor.

Figura 10. Cámara de descarga



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.thales.cica.es. Consulta: diciembre de 2016.

1.4.5.2. Generador

Es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Una máquina eléctrica es un artefacto que puede convertir bien sea energía mecánica en energía eléctrica o bien energía eléctrica en energía mecánica. Esto significa que los generadores son máquinas reversibles, que pueden ser utilizados como motores y viceversa.

Casi todos los motores prácticos y generadores convierten energía, de una forma en otra, por la acción de un campo magnético. El generador es el elemento principal de un sistema de generación de energía eléctrica porque transforma la energía mecánica en energía eléctrica. La energía mecánica se obtiene de diferentes maneras, las más conocidas se describen adelante. En la actualidad, los generadores alcanzan magnitudes bastante grandes ya que la demanda de energía y la eficiencia de los sistemas utilizados para su transmisión se han desarrollado de manera eficiente. Los generadores de inducción generan potencia reactiva pero no activa, los generadores sincrónicos sí generan potencia activa y potencia reactiva. Por ello, es preferible utilizar estos últimos para generar energía.

1.4.5.3. Línea de conexión y equipo eléctrico

Las líneas de conexión son un elemento indispensable para el equipamiento eléctrico de una central hidroeléctrica. Es necesario para el buen funcionamiento de la misma, ya que se encarga de la transformación de la tensión, de la medición de los diferentes parámetros de la energía, de la conexión a la línea y de la evacuación de la energía de la central.

Uno de los elementos fundamentales en cualquier sistema eléctrico es el transformador. De acuerdo con la potencia del generador, podrá incluir diferentes niveles de tensión y su objeto es elevar la tensión de generación al nivel de tensión de la línea de conexión, ya sea de distribución o de transmisión para poder evacuar la energía con las mínimas pérdidas posibles.

El transformador debe contar con un sistema de refrigeración que utilice convección natural o por circuito cerrado de aceite, lo cual con llevará diferentes consideraciones constructivas y de mantenimiento.

Los equipos eléctricos necesarios en una central hidroeléctrica son muy similares a los que se encuentran en cualquier otra central de generación eléctrica y, dependiendo del nivel de tensión al que se está elevando el voltaje generado, se dispondrán en una subestación eléctrica que esté diseñada adecuadamente.

Además, de acuerdo con la ubicación de la central, es importante considerar la construcción de la línea de conexión necesaria para transportar la energía producida hacia un punto de conexión en el sistema eléctrico existente y así llevar la energía hacia los centros de consumo. El coste de esta línea puede encarecer notablemente el proyecto, por lo que se debe considerar desde el inicio del desarrollo del mismo.

1.5. Tipos de centrales hidroeléctricas

Desde el punto de vista de su concepción arquitectónica, las centrales pueden ser clasificadas en:

- Centrales al aire libre, al pie de la presa o relativamente alejada de esta y conectadas por medio de una tubería en presión.
- Centrales en caverna, generalmente conectadas al embalse por medio de túneles, tuberías en presión o por la combinación de ambas.

Desde el punto de vista de cómo utilizan el agua para la generación, se pueden clasificar en:

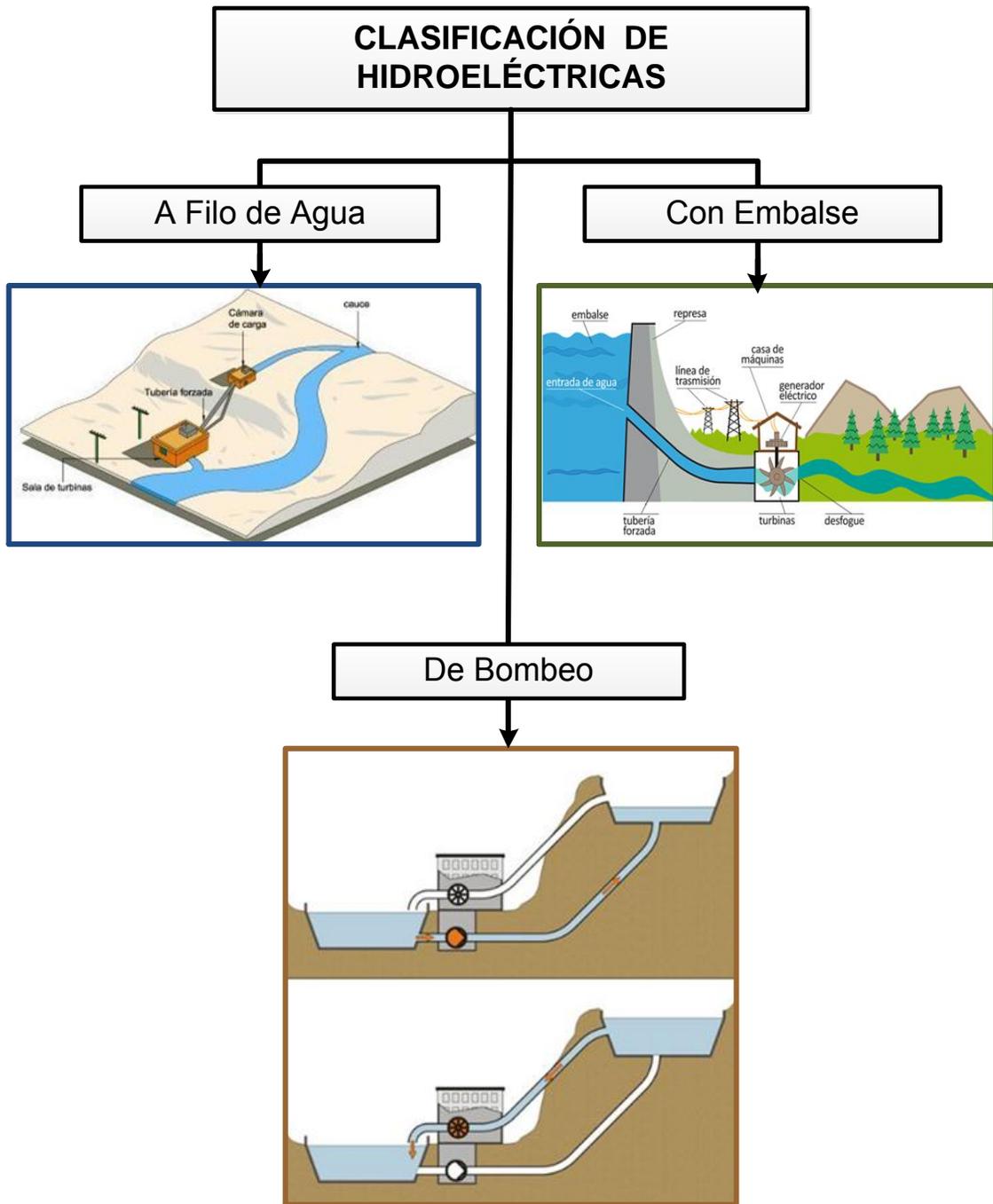
- Centrales a filo de agua. Utilizan parte del flujo de un río para generar energía eléctrica. Operan en forma continua porque no tienen capacidad para almacenar agua, no disponen de embalse. Turbinan el agua

disponible en el momento, limitadamente a la capacidad instalada. En estos casos las turbinas pueden ser de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente fuerte u horizontal cuando la pendiente del río es baja.

- Centrales acopladas a uno o más embalses. Es el tipo más frecuente de central hidroeléctrica.
- Centrales mareomotrices. Utilizan el flujo y reflujos de las mareas. Pueden ser ventajosas en zonas costeras donde la amplitud de la marea es amplia y las condiciones morfológicas de la costa permiten la construcción de una presa que corta la entrada y salida de la marea en una bahía. Se genera energía cuando la bahía se llena y cuando se vacía.
- Centrales mareomotrices sumergidas. Utilizan la energía de las corrientes submarinas.
- Centrales que aprovechan el movimiento de las olas. Este tipo de central es poco usual pero ya existen varias y cada vez más avanza.

En la siguiente figura se presentan gráficamente los tipos de centrales hidroeléctricas. También existe el tipo a filo de agua también llamado de agua fluyente, el tipo con embalse, este permite graduar la cantidad de agua que pasa por la turbina y, por último, el tipo de bombeo también conocidas como centrales de acumulación.

Figura 11. Clases de centrales hidroeléctricas



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.thales.cica.es. Consulta: diciembre de 2016.

1.5.1. A filo de agua o de agua fluyente

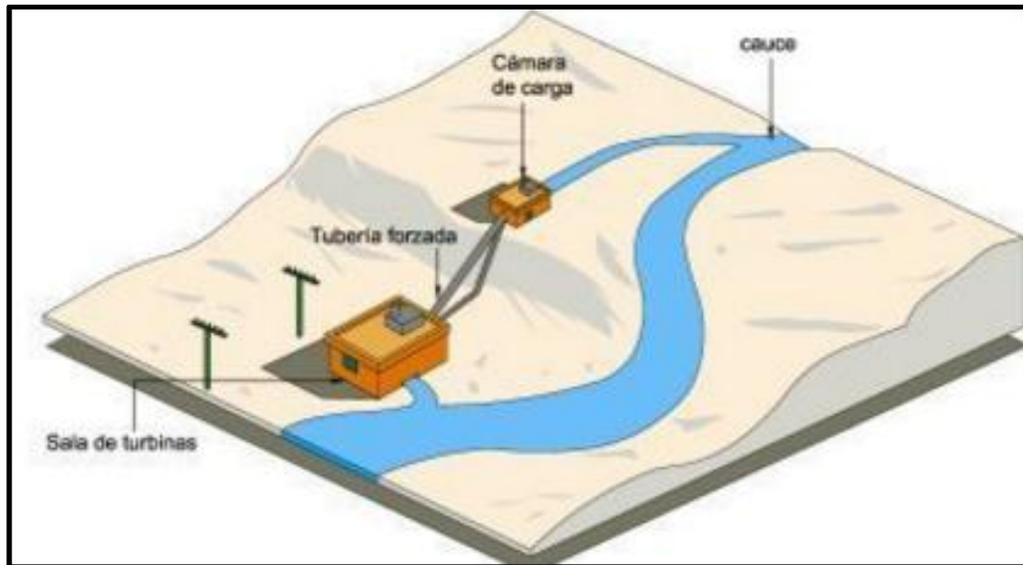
Se les llama así a las centrales hidroeléctricas que toman el agua de un río y no poseen ningún tipo de embalse o almacenamiento, es decir, que no se almacena el agua, sino que se aprovecha el agua que esté disponible en el cauce del río a cada momento. Debido a que no cuentan con reserva de agua, el caudal suministrado varía según las estacionalidades del año y las variaciones que tenga el caudal del río.

La construcción de este tipo de centrales hidroeléctricas la inversión en este tipo de obra es mínima comparada con los otros tipos de centrales, ya que únicamente se construye una presa derivada para provocar un desnivel y así ingresar el agua a la bocatoma e inicia a trabajar.

Tienen la desventaja que, al no almacenar agua, solo desarrollan su potencia máxima en temporadas de altos caudales en el río, es decir, en invierno, cuando ocurren precipitaciones abundantes y durante las épocas secas su potencia generada disminuye considerablemente.

En este tipo de central hidroeléctrica el agua del cual se obtiene la energía mecánica no es controlada de ninguna forma, no se regula la cantidad que pasa por las turbinas. Se presenta cierta desventaja con este tipo de hidroeléctrica en las estaciones del año en las que el afluente de río es bajo.

Figura 12. **Central a filo de agua**



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.thales.cica.es. Consulta: diciembre de 2016.

1.5.2. Con embalse

Esta clase de central hidroeléctrica tiene un control en la cantidad del agua que corre por las turbinas. Las centrales hidroeléctricas con embalse requieren de un gran diseño de ingeniería, ya que se modifica la geografía del lugar donde estará ubicada la central hidroeléctrica.

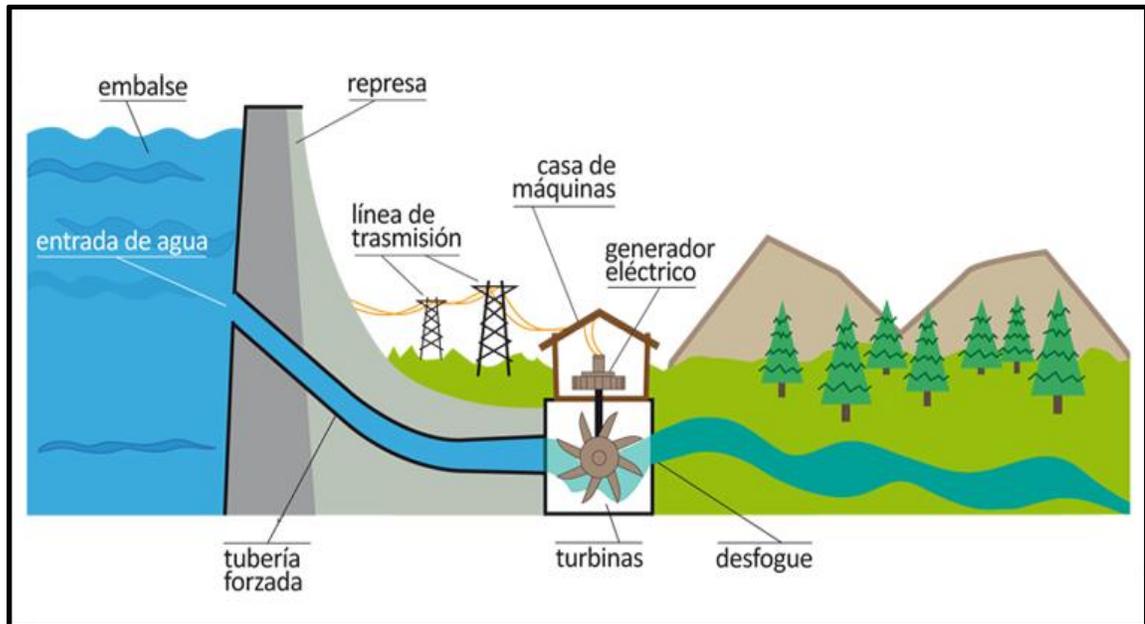
Este tipo de centrales hidroeléctricas se caracterizan porque tienen capacidad de almacenar un gran volumen de agua. Forman un embalse para lo cual, se dispone de una o más presas que contienen un volumen determinado de agua en un área delimitada. Estas centrales tienen la capacidad de controlar el agua que se utiliza para la generación eléctrica en un instante determinado, permitiendo regular el agua que se conduce hacia las turbinas para la producción eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas que utilizan embalses requieren de un gran diseño de ingeniería a la vez que es necesario considerar muchas más características propias del área de influencia de la central, además incluyen sistemas de control y manejo del agua más sofisticado y con mayor grado de tecnicidad.

Este tipo de centrales son de suma importancia para un sistema eléctrico interconectado a gran escala, ya que la posibilidad de controlar el caudal que entra en las turbinas, necesita mantener una estricta supervisión del caudal entrante al embalse. Esto permite programar y optimizar el uso que se le dará al agua para que el proceso sea óptimo. Es decir, que el agua sea utilizada según el sistema y su demanda la requiera, tomando en cuenta las otras tecnologías del sistema y sus características.

Mientras mayor sea la capacidad instalada de la central y el volumen de almacenamiento de su embalse, más rigurosos deberá ser el monitoreo que se realice a toda la central debido a la gran inversión para construir una central de este tipo y al peligro potencial que representa para las comunidades o personas que se encuentren ubicadas aguas abajo del mismo río, un gran volumen de agua almacenada aguas arriba de un río.

Figura 13. **Central con embalse**



Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.thales.cica.es. Consulta: diciembre de 2016.

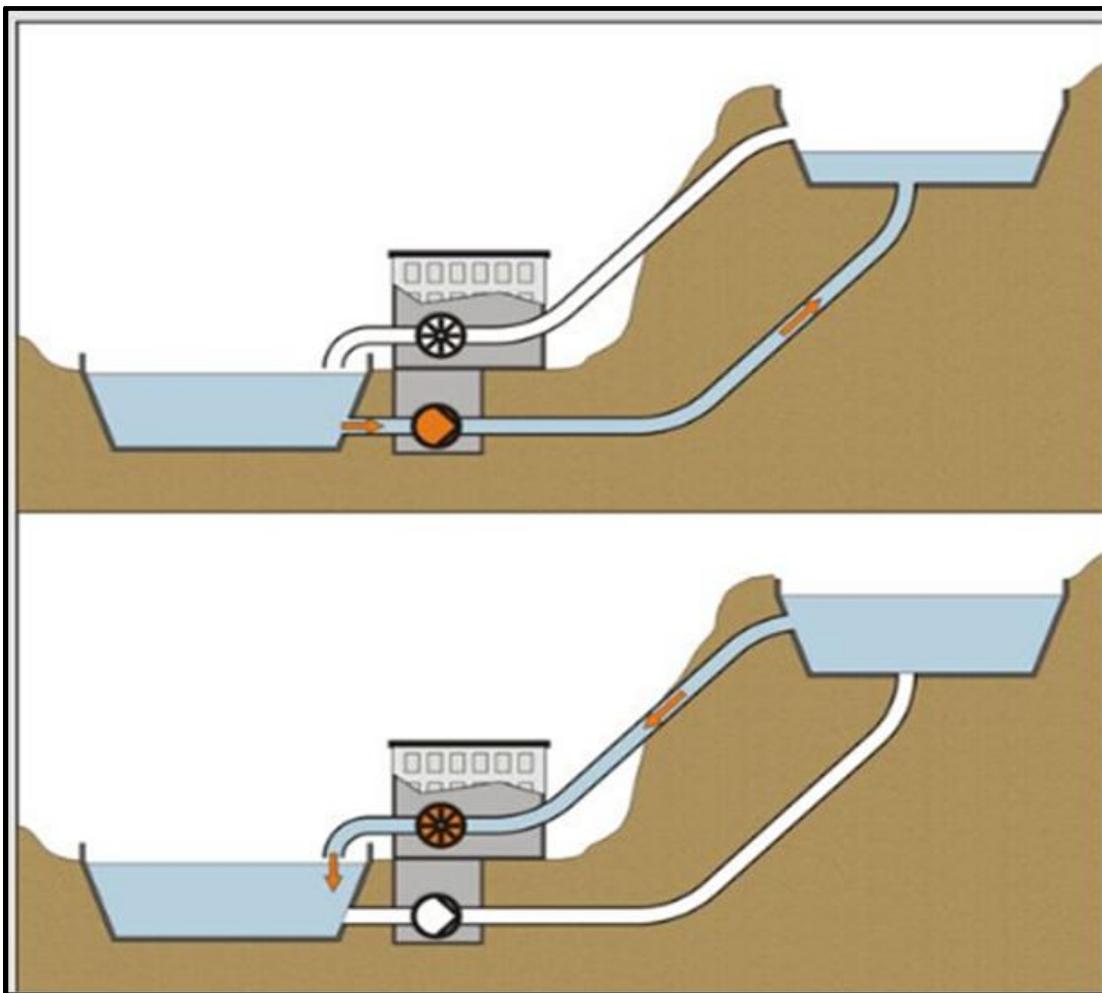
1.5.3. **De bombeo**

Una central hidroeléctrica de bombeo se caracteriza por estar ubicada en zonas geográficas en las que el recurso del líquido es limitado o escaso, ya que el mismo se realiza para obtener su energía mecánica. La energía eléctrica generada es utilizada en parte por las bombas que envían de nuevo el agua hacia un embalse colocado en la parte superior de la central hidroeléctrica.

Cada tipo de central hidroeléctrica presenta ventajas. En las centrales hidroeléctricas de bombeo, es significativo que el líquido que se utiliza para generar la potencia mecánica que mueve las turbinas es retornado a un embalse principal para ser utilizado nuevamente.

Como en cualquier tipo de hidroeléctrica, las de bombeo también presentan un nivel bajo de contaminación, ya que el agua solamente pasa por las turbinas proporcionando su energía cinética y luego se almacena para ser bombeada de nuevo.

Figura 14. **Central de bombeo**

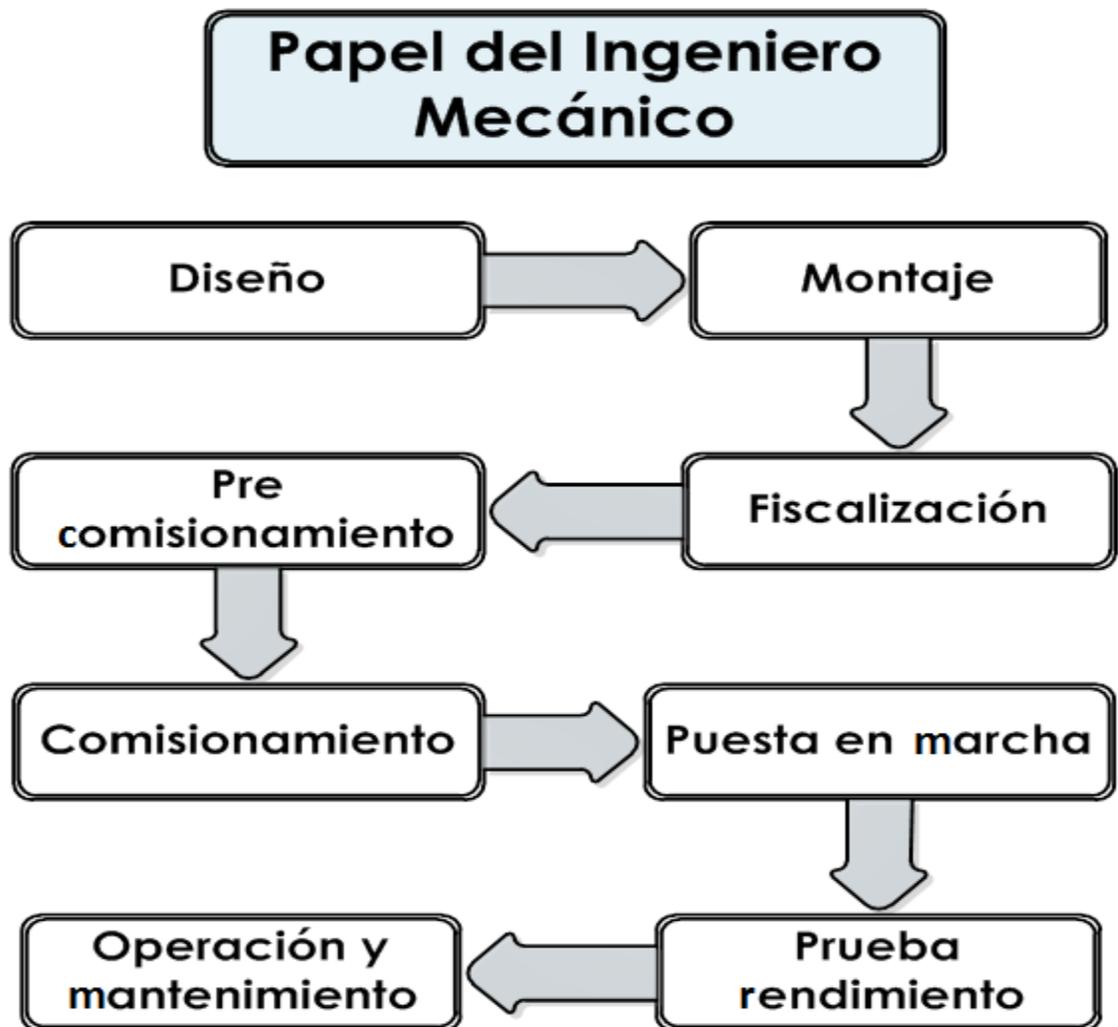


Fuente: *Centrales hidroeléctricas*. www.thales.cica.es. Consulta: diciembre de 2016.

1.6. Papel del ingeniero mecánico en una central hidroeléctrica

En el siguiente apartado se desarrollará el tema sobre el papel que desempeña un ingeniero mecánico en una central hidroeléctrica, detallando las labores específicas que realiza.

Figura 15. Ingeniero Mecánico en una central hidroeléctrica



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se presenta por fases el rol que desempeña el ingeniero mecánico. A continuación, se describe cada papel.

- **Diseño:**
 - En conjunto con otras disciplinas es capaz de desarrollar especificaciones de turbinas hidráulicas.
 - Selecciona turbinas hidráulicas según condiciones geográficas, determina diámetros de tuberías de presión.
 - Diseña sistemas oleodinámicos de regulación de turbina.
 - Analiza distintos tipos de flujos en canales y tuberías, entre otros.

- **Montaje:**
 - Instala equipos según especificaciones técnicas.
 - Verifica holguras y posicionamientos de elementos de máquinas por medio de instrumentación.
 - Verifica la calidad de los materiales e insumos.

- **Actividad de fiscalización:**
 - Audita la ingeniería de detalle de los planos de fabricación.
 - Audita el montaje mecánico en base a los criterios y normas establecidas de los equipos del proyecto.

- **Pre comisionamiento:**
 - Controla las tareas de ajuste no operativo y comprobaciones en frío, sin energizar, ni fluidos de proceso, orientadas a garantizar la integridad de la instalación, previa a la entrega para dar paso al comisionado y puesta en marcha.

- Comisionamiento:
 - Realiza las pruebas asociadas a verificar las instalaciones de la planta con energía, de tal manera de alcanzar la condición de listo para puesta en marcha. Estas pruebas requieren energía, tanto eléctrica, como fluidos a presión.

- Puesta en marcha:
 - Dirige las actividades con el fin de realizar el primer arranque de la instalación, el ajuste operativo y las pruebas necesarias para garantizar el inicio de la operación y obtener los productos esperados a la salida de la instalación.

- Prueba de rendimiento:
 - Verifica la capacidad de la planta para funcionar en las condiciones de operación y producción previstas en el diseño. Compara el diseño original con los resultados reales de operación a plena carga de la planta.

- Operación y mantenimiento:
 - Planifica y ejecuta la operación y mantenimiento de cada uno de los equipos.
 - Planifica y ejecuta la operación y mantenimiento de la planta en conjunto.
 - Maximiza la eficiencia y despacho de las unidades generadoras.

2. OLEODINÁMICA

2.1. Aplicación de mecánica de fluidos en oleodinámica

En las aplicaciones industriales, la utilización de la potencia hidráulica es mejor conocida con el nombre de oleohidráulica. Sin embargo, según algunos teóricos es un nombre impreciso para esta aplicación pues hace referencia al agua y al aceite. Por lo mismo se considera que el mejor término es oleodinámica, ya que hace referencia al movimiento de un fluido, en este caso, un aceite.

Las aplicaciones de la oleodinámica se pueden dividir en dos grandes áreas.

- Oleodinámica móvil.
- Oleodinámica industrial.
- La oleodinámica móvil se refiere a todas las aplicaciones de maquinaria que se encuentran en movimiento, como camiones de volteo, retroexcavadoras.
- La oleodinámica industrial se refiere a todas aquellas aplicaciones que tienen que ver con maquinaria utilizada para la transformación de materia prima en producto terminado, como máquinas inyectoras, máquinas sopladoras, entre otros.

Los sistemas oleodinámicos están conformados por los siguientes elementos principales:

- Unidad oleodinámica
- Líneas de conducción del fluido
- Válvulas
- Actuadores

La unidad oleodinámica a su vez está compuesta por los siguientes elementos:

- Filtros
- Motor eléctrico
- Bomba
- Válvula reguladora de presión

Lo anterior ilustra cómo está compuesto un sistema oleodinámico. Es necesario comprender los términos anteriores debido a que es en este sistema donde se puede efectuar diferentes transformaciones de la energía.

En el siguiente apartado se describirán y analizarán los aspectos que conlleva la aplicación de mecánica de fluidos en oleodinámica, que inicia con el Principio de Pascal, Ley de continuidad, Principio de Bernoulli, índice de viscosidad, cavitación, golpe de ariete, flujo laminar y turbulento, entre otros.

2.1.1. Principio de Pascal

Es una ley enunciada por el físico y matemático francés Blaise Pascal que se resume en la frase: la presión ejercida en cualquier parte de un fluido incompresible y en equilibrio dentro en un recipiente de paredes indeformables, se transmite por igual en todas las direcciones en todo el fluido. Este principio se aplica en los gatos y prensas hidráulicas ya que es el principio fundamental de la hidráulica.

Un líquido confinado en un envase y encerrado en su parte superior por un émbolo sobre el cual actúa una fuerza. En este caso la presión externa en la superficie superior del líquido está dada por una característica de cualquier fluido en reposo: es que la fuerza ejercida sobre cualquier partícula del fluido es la misma en todas las direcciones. Si las fuerzas fueran desiguales, la partícula se desplazaría en la dirección de la fuerza resultante.

De esto, se deduce que la fuerza por unidad de superficie que el fluido ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene es perpendicular a la pared en cada punto sea cual sea su forma. Si la presión no fuese perpendicular el fluido se movería a lo largo de la pared.

El principio de Pascal afirma que la presión aplicada sobre el fluido contenido en un recipiente se transmite por igual en todas las direcciones y a todas partes del recipiente, siempre que se puedan despreciar las diferencias del peso debidas al peso del fluido.

Este principio tiene aplicaciones muy importantes en hidráulica y Pascal en 1647, la formuló por primera vez en forma más amplia que la de Arquímedes.

Generalmente se puede definir la presión como la fuerza que actúa sobre una determinada área a continuación se muestra la fórmula.

Fórmulas para obtener la presión

$$1. \text{ Presión } (Pa) = \frac{\text{Fuerza } (N)}{\text{Área } (m^2)} \quad (\text{Para el sistema Internacional})$$

$$2. \text{ Presión } (psi) = \frac{\text{Fuerza } (lb)}{\text{Área } (in^2)} \quad (\text{Para el sistema Inglés})$$

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}}$$

$$\text{Fuerza} = F = P * A$$

$$F_{(N)} = P_{(Pa)} \times A_{(m^2)} \quad (\text{Sistema Internacional})$$

$$F_{(lb)} = P_{(psi)} \times A_{(in^2)} \quad (\text{Sistema Inglés})$$

Palanca hidráulica

Este mecanismo describe físicamente el principio de Pascal, donde dos cilindros hidráulicos de diferentes áreas y comunicados entre sí permiten transformar una fuerza de entrada aplicada al cilindro de menor área en una fuerza superior de salida aplicada al cilindro de mayor área. También se denomina prensa hidráulica.

Cuando se aplica una fuerza F_1 sobre el émbolo de menor área A_1 se genera una presión P_1 :

$$P1 = \frac{F1}{A1}$$

Del mismo modo en el segundo émbolo:

$$P2 = \frac{F2}{A2}$$

Se observa que el líquido está comunicado, luego por el principio de Pascal, la presión en los dos pistones es la misma. Por tanto, se cumple que:

$$P1 = P2$$

Esto es:

$$\frac{F1}{A1} = \frac{F2}{A2}$$

Y la relación de fuerzas:

$$\frac{F1}{F2} = \frac{A1}{A2}$$

Luego, la fuerza resultante de la prensa hidráulica es:

$$F2 = \frac{F1 \times A2}{A1}$$

Donde:

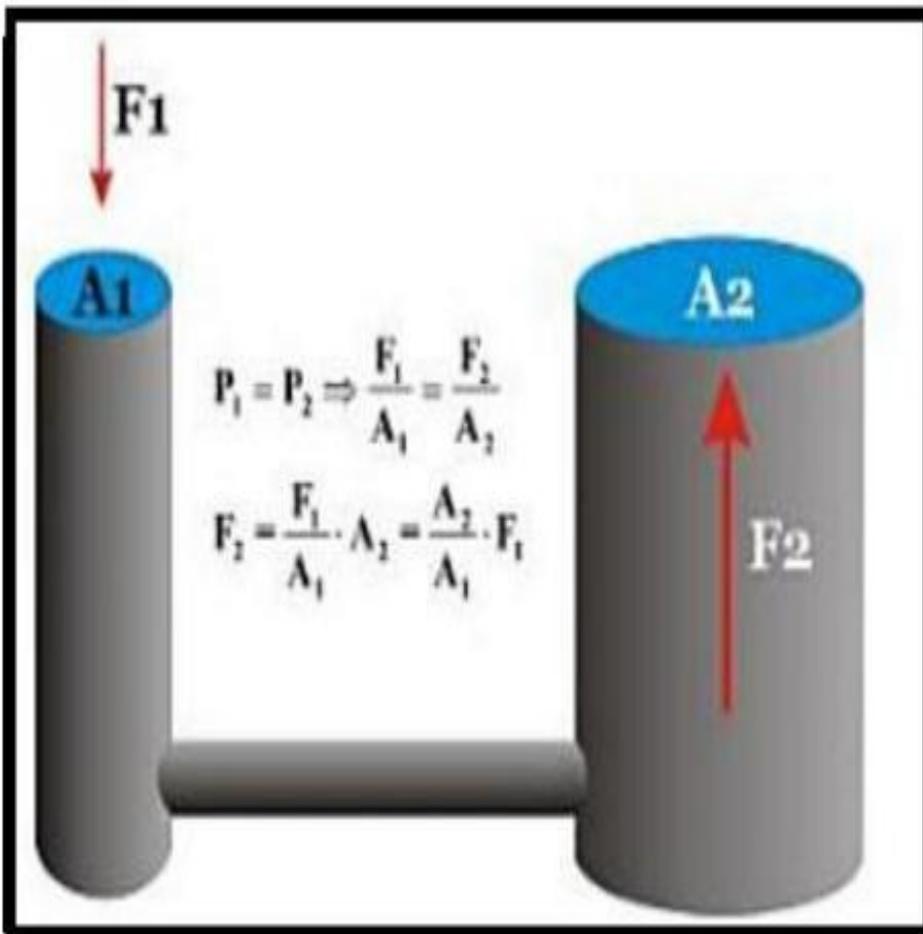
F1= fuerza del émbolo menor en N

F2 = fuerza del émbolo mayor en N

A1 = área del émbolo menor en m²

A2 = área del émbolo mayor en m²

Figura 16. Prensa hidráulica



Fuente: *Recursos educativos*. www.didactalia.net. Consulta: diciembre 2016.

2.1.2. Ley de continuidad

Esta ley es consecuencia de la ley de la conservación de la materia. Esta ecuación también recibe el nombre de ecuación de continuidad del flujo, su enunciado es: que la cantidad de masa por unidad de tiempo que ingresa por un punto debe ser igual a la cantidad de masa por unidad de tiempo que sale por punto del recorrido del fluido. Si el fluido es un líquido no viscoso e incompresible, su densidad permanece constante durante el flujo, entonces se puede eliminar la densidad en ambos miembros de la ecuación del flujo, por lo que la ecuación de continuidad del flujo se reduce a la continuidad del caudal del líquido.

Considerándose el tramo de un tubo de corriente, como se indica en las secciones A1 y A2 y velocidades V1 y V2 respectivas, la cantidad de líquido de peso específico que pasa por una sección, en una unidad de tiempo y si el líquido se considera incompresible, como la siguiente ecuación:

$$Q_1 = Q_2$$
$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

Donde surge que el caudal está expresado de la siguiente fórmula:

$$Q = V \times A$$

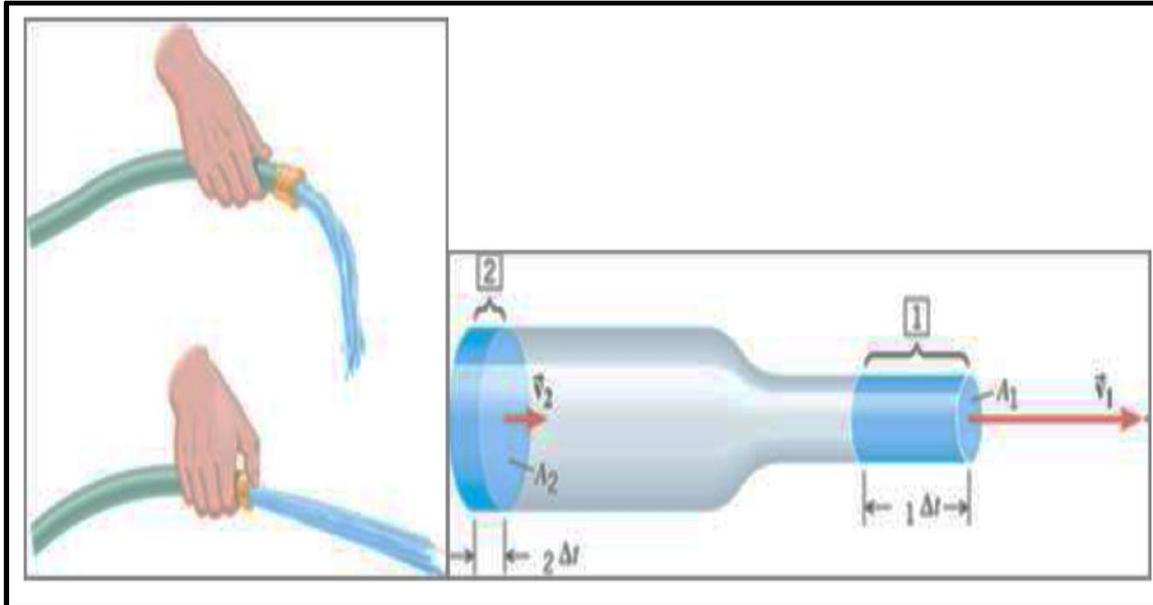
Donde:

Q = caudal (m³/s)

V = velocidad media de la sección (m/s)

A = área de la sección de la tubería

Figura 17. **Representación gráfica de la Ley de continuidad**



Fuente: *Recursos educativos*. www.didactalia.net. Consulta: diciembre 2016.

2.1.3. **El principio de Bernoulli**

Es una ley que se deduce a partir de la ley de conservación de la energía para un fluido en movimiento. Esta ley fue descubierta por el matemático holandés Daniel Bernoulli (1700-1782). Su enunciado establece lo siguiente: la presión neta ejercida a un fluido en movimiento es igual a la de los cambios de la energía cinética y potencial por unidad de volumen que ocurren durante el flujo.

La ecuación de Bernoulli también puede ser escrita entre dos puntos de la misma línea de corriente como:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2$$

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada

g = aceleración gravitatoria

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

P = presión a lo largo de la línea de corriente

ρ = densidad del fluido

A partir de esta también se puede escribir una ecuación equivalente y que tiene la siguiente forma:

$$P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho (v_2)^2 = P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho (v_1)^2$$

Es decir que energía total por unidad de volumen entregada al fluido en movimiento es la misma en todos los puntos diferentes del camino recorrido por el fluido. El principio de Bernoulli también denominado ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente.

Lo expuesto en su obra hidrodinámica (1738) expresa que, en un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento, en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

- Cinético: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
- Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.
- Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

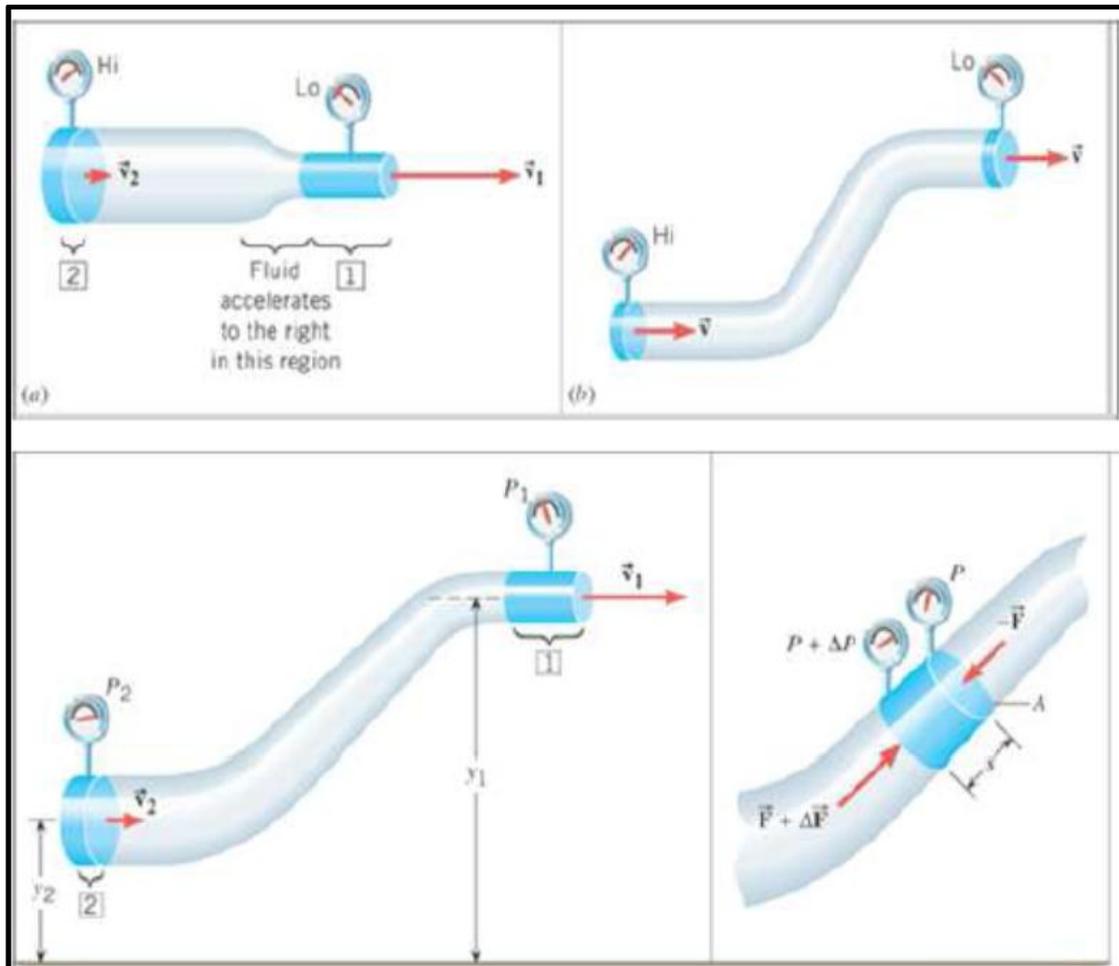
Viscosidad (fricción interna) = 0 es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica.

Se encuentra en una zona no viscosa del fluido.

- Caudal constante
- Fluido incompresible - ρ es constante
- La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente

Aunque el nombre de la ecuación se debe a Bernoulli, la forma arriba expuesta fue presentada por primera vez por Leonhard Euler. Un ejemplo de aplicación del principio se observa en el flujo de agua en tubería.

Figura 18. Representación gráfica de Bernoulli



Fuente: *Recursos educativos*. www.didactalia.net. Consulta: diciembre 2016.

2.1.4. Índice de viscosidad

Viscosidad es la resistencia del aceite a fluir y es la cualidad singular más importante para tener en cuenta al seleccionar el aceite. Existen la viscosidad absoluta y la cinemática.

La viscosidad absoluta representa la viscosidad real de un líquido y se mide por el tiempo que demora un lubricante en fluir por una serie de tubos capilares estrechos a una temperatura dada. Las unidades de viscosidad absoluta más utilizadas son las siguientes:

- Poise, en sistema métrico: $1 \text{ Poise} = 1 \text{ (dina} \cdot \text{s) / cm}^2$
- Reyn, en sistema inglés: $1 \text{ Reyn} = 1 \text{ (lbf} \cdot \text{s) / pulg}^2$

La viscosidad cinemática es la más utilizada para expresar esta propiedad del fluido. La viscosidad cinemática o de movimiento del fluido equivale a la viscosidad absoluta dividida por su densidad, ambas propiedades bajo las mismas condiciones de temperatura y las mismas unidades. La unidad más utilizada para expresar la viscosidad cinemática es el Centistoke (Cst). En general la viscosidad de un aceite se puede especificar en alguna de las siguientes unidades:

- Segundos Saybolt Universal (SSU)
- Segundos Saybolt Furol (SSF) para aceites de mayor viscosidad
- Centistokes (Cst)
- Segundos Redwood Nro. 1, Universal
- Segundos Redwood Nro. 2, Admiralty
- Grados Engler (°E)

La viscosidad se mide, generalmente, según ASTM-D-445, en este método se emplea un Viscosímetro *Saybolt Universal* (VSU), que mide el tiempo que tardan 60 ml de lubricante en escurrir por un tubo de 17,6 mm de diámetro y 12,25 mm de longitud a una temperatura dada.

Se dice que los lubricantes que fluyen libremente tienen baja viscosidad y puede que no soporten cargas entre los elementos. En cambio, los que tienen alta resistencia a fluir, se dice que tienen alta viscosidad. Este sin embargo, en algunos casos no es capaz de llegar a todos los intersticios. La viscosidad de todos los lubricantes decrece con la temperatura, pero no de la misma manera.

Como la fricción interna actúa como resistencia contra la modificación de la posición de las moléculas al actuar sobre ellas una tensión de cizallamiento. La viscosidad es una propiedad que depende de la presión y temperatura. La viscosidad necesaria para lubricar un equipo dependerá de las condiciones a que estén expuestos los equipos y sus distintos elementos.

El índice de viscosidad es un valor arbitrario, cuya función es caracterizar la variación de viscosidad cinemática de un derivado de petróleo. Un fluido con índice de viscosidad alto indica un pequeño cambio en la viscosidad con respecto a la temperatura, mientras que un índice de viscosidad bajo muestra un cambio considerable de la viscosidad con respecto a la temperatura.

El índice de viscosidad se considera como una importante característica para la selección de un aceite lubricante. Las variaciones de temperatura afectan a la viscosidad del lubricante generando cambios en esta, esto implica que a altas temperaturas la viscosidad decrece y a bajas temperaturas aumenta.

La viscosidad suele llamarse viscosidad absoluta o dinámica para evitar confundirla con la viscosidad cinemática, que es el cociente de la viscosidad por la densidad.

La viscosidad cinemática interviene en muchas aplicaciones, como en el número de Reynolds, que se refiere a las dimensiones de la unidad técnica, $1 \text{ m}^2/\text{seg}$, no tienen nombre especial; la unidad en el sistema cegesimal se llama Stoke y es $1 \text{ cm}^2/\text{seg}$. Para convertir en el sistema técnico la unidad de viscosidad cinemática en la unidad de viscosidad, hay que multiplicar por la densidad expresada en UTM por m^3 . Para pasar del poise al *Stoke* hay que multiplicar por la densidad en g/cm^3 , que es numéricamente igual al peso específico.

La viscosidad es prácticamente independiente de la presión y depende únicamente de la temperatura. La viscosidad cinemática de líquidos y de gases a una presión dada es sustancialmente función de la temperatura. La forma transpuesta de la siguiente ecuación sirve para definir la constante de proporcionalidad:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Ecuación de Newton de la viscosidad}$$

Se denomina coeficiente de viscosidad, viscosidad absoluta, viscosidad dinámica, debido a que está relacionada con la fuerza o simplemente viscosidad del fluido. Las dimensiones de la viscosidad absoluta son fuerza por unidad de área partido por el gradiente de velocidad. En el sistema internacional de unidades, las unidades de viscosidad absoluta son las siguientes:

$$\text{Dimensiones de } \mu = \frac{\text{Dimensiones de } \tau}{\text{Dimensiones de } du/dy} = \frac{\text{N}/\text{m}^2}{\text{s}^{-1}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{seg} = \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{seg}}$$

Viscosidad cinemática (ν), así denominada por que la fuerza no está involucrada en las dimensiones, quedando únicamente la longitud y el tiempo, como en cinemática. De esta forma:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{[\text{Centi Poise}]}{\left[\frac{\text{gramos}}{\text{cm}^3} \right]} = \frac{\frac{\text{gr}}{\text{cm} \times \text{seg}}}{\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} = [\text{Stoke}]$$

La viscosidad cinemática se mide habitualmente en m^2/seg en el sistema internacional y en ft^2/seg en el sistema británico de unidades. Anteriormente, las unidades utilizadas en el sistema (CGS) eran cm^2/seg , también denominado Stoke (St). El centistoke (cSt) ($0.01\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{seg}$) era la unidad más conveniente en muchas ocasiones.

2.1.4.1. Clasificación de viscosidad ISO

La temperatura de referencia para la clasificación debería ser razonablemente cercana al promedio de la experiencia de uso industrial. También debería relacionarse estrechamente a otras temperaturas seleccionadas empleadas para definir propiedades tales como el índice de Viscosidad (IV), el cual puede ayudar a definir un lubricante.

Un estudio de temperaturas posibles indicó que 40°C era apropiada para las clasificaciones de lubricantes industriales, así como para la definición de las propiedades de los lubricantes. La clasificación de viscosidad ISO consecuentemente está basada en la viscosidad cinemática a 40°C .

Esta clasificación define 20 grados de viscosidad en el rango de 2 a 3200 mm²/s, 1 mm²/s es igual a 1 cSt, a 40°C. Para líquidos con base petróleo, esto cubre aproximadamente el rango entre el queroseno y el aceite de cilindros. Cada grado de viscosidad se designa por el número entero más cercano al punto medio de su viscosidad cinemática en mm²/s a 40°C, y se permite un rango de +/- 10 por ciento de este valor. En la Tabla 1 se enlistan los 20 grados de viscosidad y los límites apropiados de cada uno.

Tabla I. **Grados de viscosidad ISO**

Grado de viscosidad ISO VG	Viscosidad cinemática media cSt @ 40°C	Límite inferior cSt @ 40°C	Límite superior cSt @ 40°C
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.00	11.00
15	15	13.50	16.50
22	22	19.80	24.20
32	32	28.80	35.20
46	46	41.40	50.60
68	68	61.20	74.80
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	2420
3200	3200	2880	3520

Fuente: www.widman.biz. Consulta: diciembre de 2016.

2.1.5. Cavitación

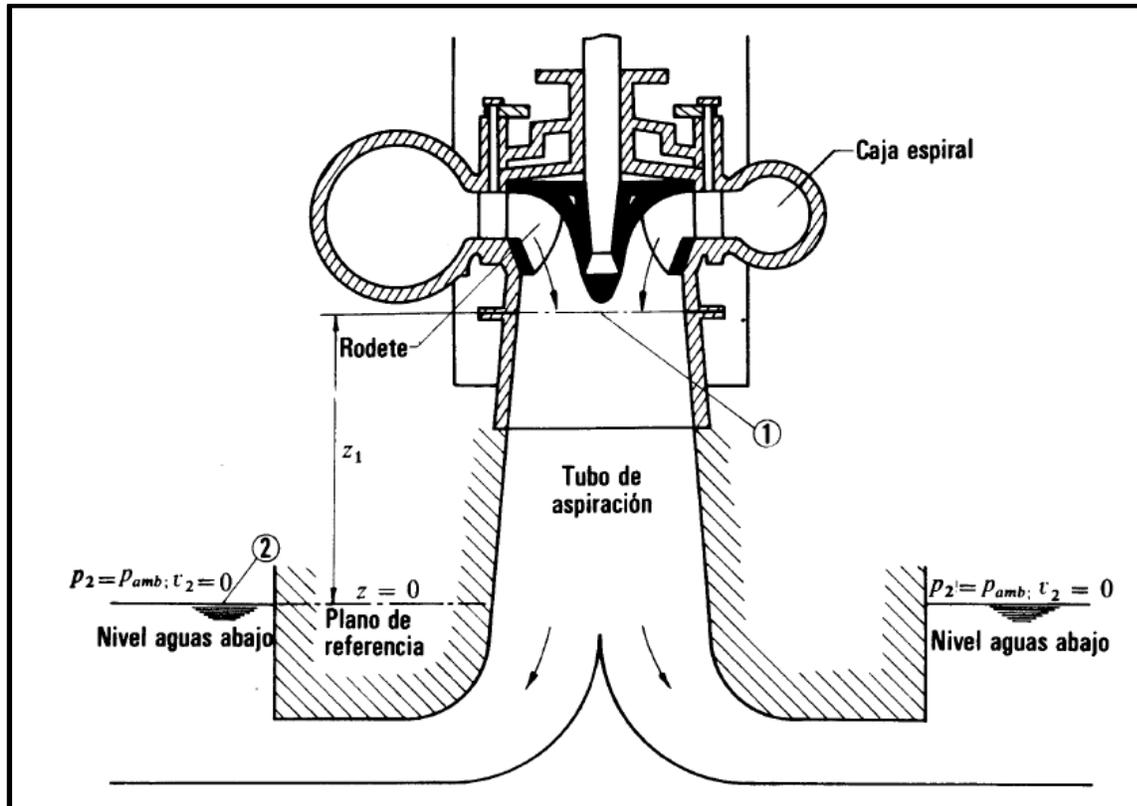
La cavitación es un fenómeno que se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible.

El fenómeno puede producirse lo mismo en estructuras hidráulicas estáticas como en máquinas hidráulicas como bombas, hélices o turbinas. Por los efectos destructivos que en las estructuras y máquinas hidráulicas mal proyectadas o mal instaladas produce la cavitación es preciso estudiar este fenómeno, para conocer sus causas y controlarlo. Cuando un líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, el líquido hierve y forma burbujas de vapor. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, implotando bruscamente las burbujas. Este fenómeno se llama cavitación.

Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando cambian de estado, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida. El fenómeno, generalmente, va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea con diferentes partes de la máquina.

En una turbina de reacción el tubo de aspiración, que es el de evacuación de la turbina, produce una depresión a la salida del rodete que hay que controlar para que no se origine en dicho lugar el fenómeno de cavitación.

Figura 19. Cavitación



Fuente: AGÜERA, José. *Turbinas hidráulicas*. www.es.slideshare.net. Consulta: diciembre 2016.

Donde:

p_1, p_2 – presiones absolutas en los puntos 1 y 2

H_{r1-2} – pérdida de altura entre los puntos 1 y 2

Z_1, z_2 – cotas de los puntos 1 y 2, tomando como plano de referencia el plano horizontal que se indica en cada figura.

2.1.6. Golpe de ariete

El golpe de ariete o pulso de Joukowski, llamado así por el ingeniero ruso Nikolái Zhukovski, es el principal causante de averías en tuberías e instalaciones hidráulicas. Golpe de ariete es el término utilizado para denominar el choque producido en una conducción, por una súbita disminución en la velocidad del fluido. Se produce al cerrar una válvula bruscamente o cuando hay algún cese de energía. Por lo tanto, hay que verificar que la tubería sea capaz de aguantar esta sobrepresión. En algunos casos se puede colocar una válvula de alivio para reducir el golpe de ariete.

El golpe de ariete se origina debido a que el fluido es ligeramente elástico, aunque en diversas situaciones se puede considerar como un fluido no compresible. En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula o un grifo instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de fluido que se han detenido, son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento.

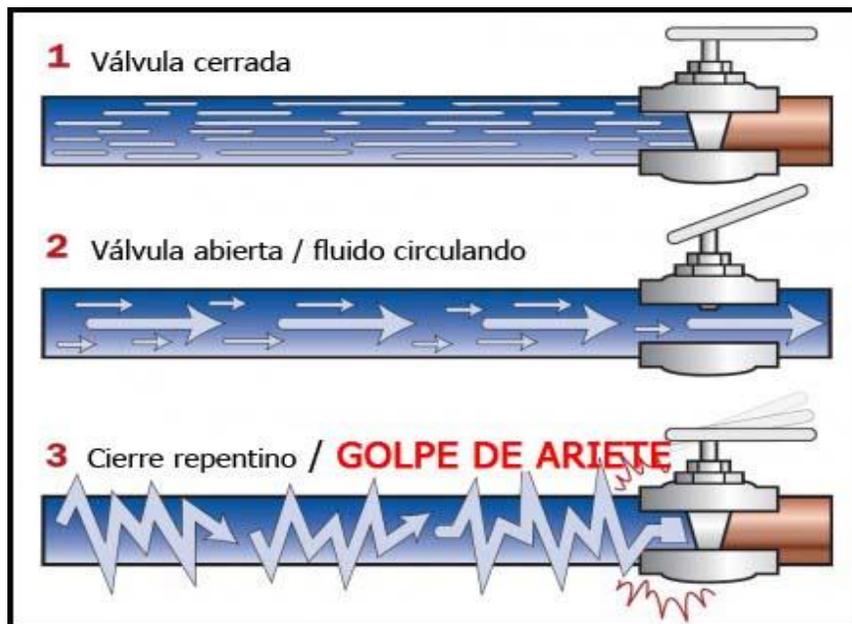
Esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido. Esta sobrepresión tiene dos efectos, comprime ligeramente el fluido, reduciendo su volumen, y dilata ligeramente la tubería. Cuando todo el fluido que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y, por tanto, tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal. Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario.

El fluido se desplaza en dirección contraria, pero al estar la válvula cerrada, se produce una depresión respecto de la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el fluido puede pasar al estado líquido a gaseoso formando una burbuja mientras que la tubería se contrae.

Cuando alcanza el otro extremo de la tubería, si la onda no se ve disipada, por ejemplo, en un depósito a presión atmosférica, se reflejará siendo mitigada progresivamente por la propia resistencia a la compresión del fluido y a la dilatación de la tubería.

Si el cierre o apertura de la válvula es brusco, es decir, si el tiempo de cierre es menor que el tiempo que tarda la onda en recorrer de la tubería de ida y vuelta, la sobrepresión máxima.

Figura 20. **Golpe de ariete**



Fuente: FERNÁNDEZ, Antonio. www.empresasconstruccion.es. Consulta: diciembre 2016.

2.1.7. Flujo laminar y turbulento

La situación ideal del flujo en una tubería se establece cuando las capas de fluido se mueven en forma paralela una a la otra. Esto se denomina flujo laminar, las capas de fluido próximas a las paredes internas de la tubería se mueven lentamente, mientras que las cercanas al centro lo hacen rápidamente.

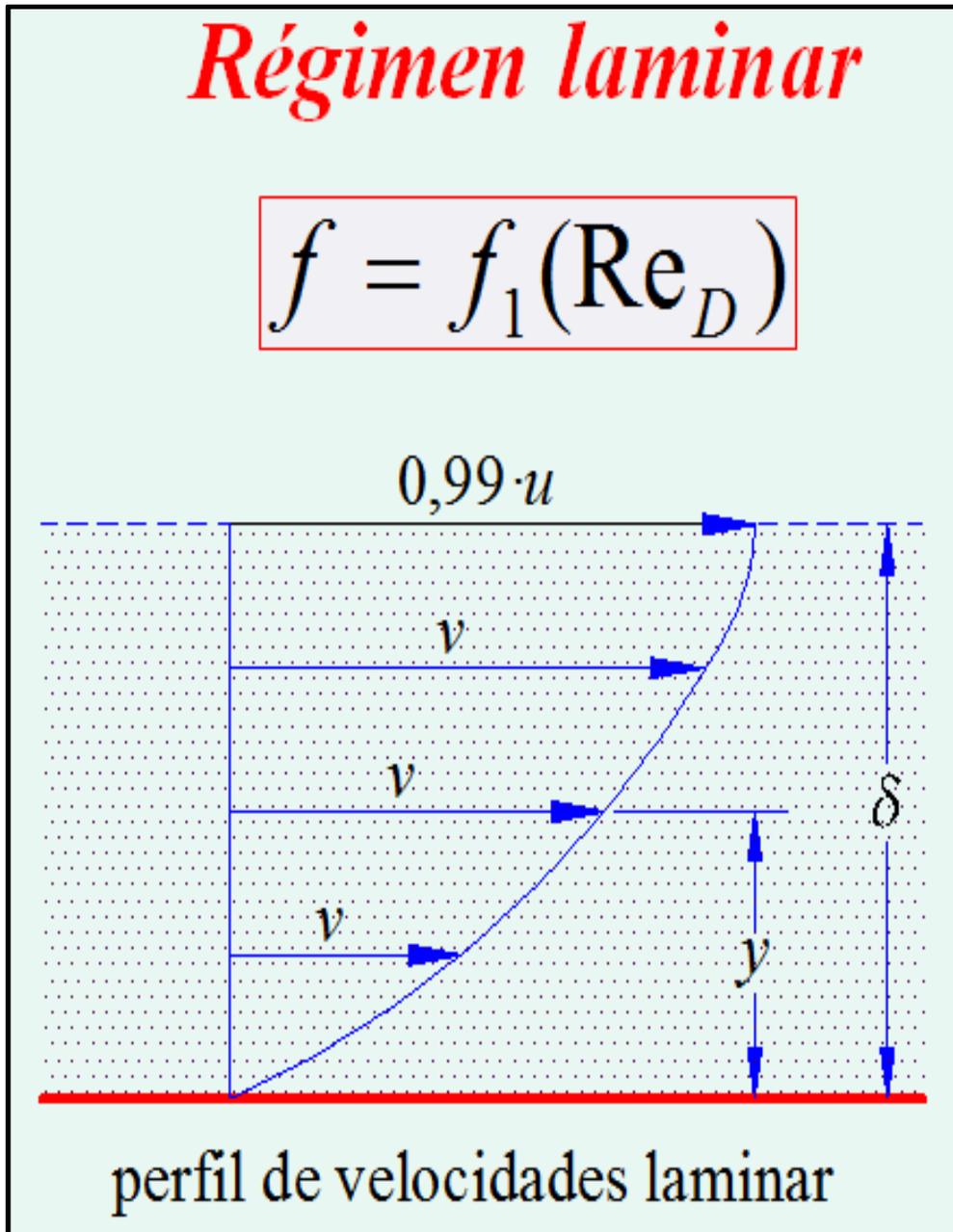
Es necesario dimensionar las tuberías de acuerdo con el caudal que circulará por ellas. Una tubería de diámetro reducido provocará elevadas velocidades de circulación y como consecuencia, pérdidas elevadas por fricción; una tubería de gran diámetro resultará costosa y difícil de instalar.

Se produce una situación de flujo turbulento donde las partículas de fluido se mueven en forma desordenada respecto de la dirección del flujo. La turbulencia es causada por el exceso de velocidad de circulación, cambios bruscos del diámetro de la tubería, y por su rugosidad interna la turbulencia produce excesiva pérdida de presión en los sistemas y sobrecalentamiento del aceite. A menudo puede ser detectada por el ruido que produce la circulación por las tuberías.

Para prevenir la turbulencia, las tuberías deben ser de diámetro adecuado, no tener cambios bruscos de diámetro u orificios restrictores de bordes filosos que produzcan cambios de velocidad.

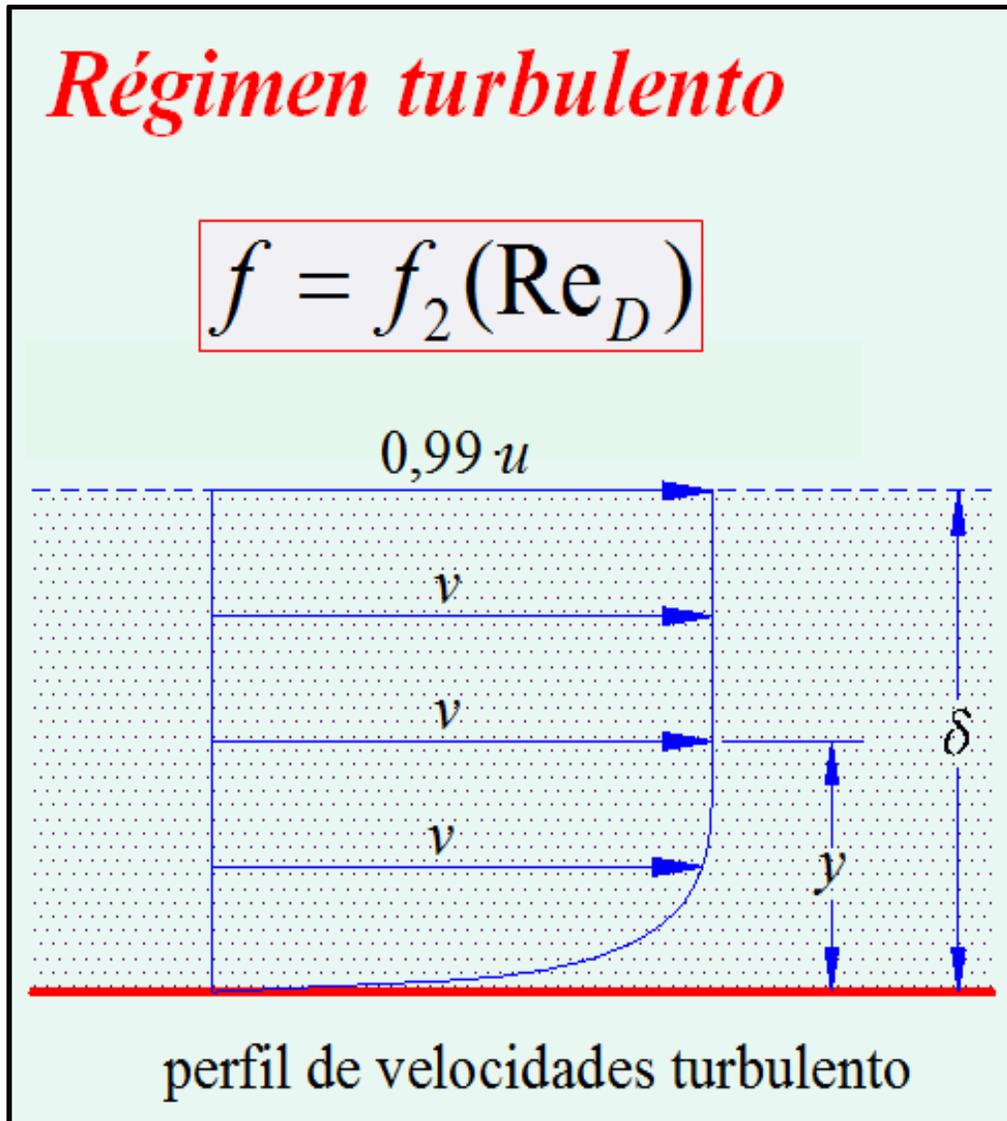
Las siguientes graficas muestran el perfil de velocidades laminares y turbulentas en una tubería lisa.

Figura 21. Tubería lisa régimen laminar



Fuente: *Tecnología mecánica*. www.sitenordeste.com. Consulta: diciembre de 2016.

Figura 22. Tubería lisa régimen turbulento



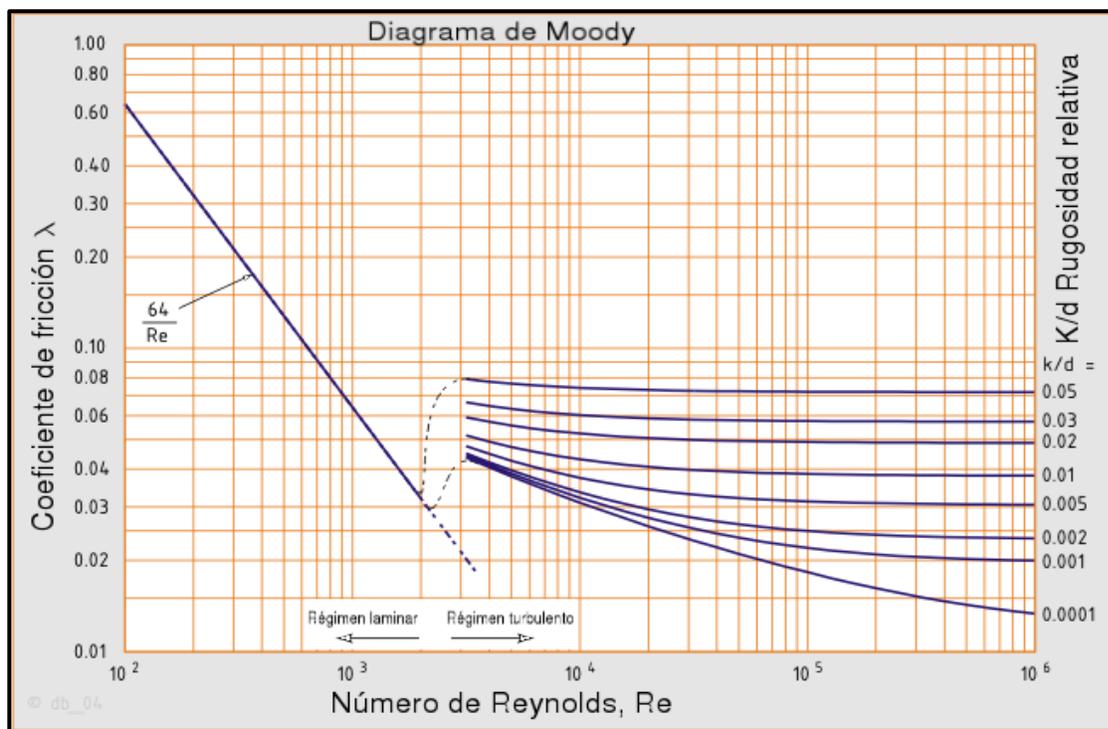
Fuente: *Tecnología mecánica*. www.sitenordeste.com. Consulta: diciembre de 2016.

El diagrama de Moody es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de una tubería, diagrama hecho por Lewis Ferry Moody.

Presenta regiones características:

- Región laminar, $Re < 2100$
- Región de transición, $2100 < Re < 4000$
- Región Turbulenta, $Re > 4000$

Figura 23. Diagrama de Moody



Fuente: www.fisica.laguia2000.com. Consulta: diciembre de 2016.

2.2. Unidad oleodinámica de presión

Es el suministro de potencia oleodinámica, el objetivo fundamental que cumple el sistema oleodinámico en combinación con los circuitos electrónicos, regulando la velocidad de la turbina para mantener, durante la generación, una frecuencia constante, pese a cualquier variación de carga que se produzca.

La regulación de la velocidad de la unidad está asegurada por un regulador electrónico y servomotores oleodinámicos para mando de las agujas de los inyectores y de los deflectores. Los inyectores aplican el chorro de agua a gran presión sobre el rodete de la turbina para hacerla girar, mientras que los deflectores interrumpen el chorro de agua de forma súbita en caso de un paro de emergencia de la unidad, aún antes que se cierren los inyectores. A continuación, se describen las ventajas y los posibles inconvenientes del que pueda padecer el sistema oleodinámico.

Ventajas

- Simplicidad: pocas piezas en movimiento, bombas, motores, cilindros.
- Tamaño: pequeño comparado con la mecánica y la electricidad de igual potencia.
- Multiplicación de fuerzas: fácil control de fuerzas.
- Movimientos suaves y silenciosos.
- Fácil inversión del sentido de marcha.
- Regulación sencilla de velocidad.
- Fácil protección contra sobrecargas.

Inconvenientes

- Limpieza: en la manipulación de los aceites, aparatos y tuberías, como el lugar de ubicación de la máquina. En la práctica, hay muy pocas máquinas hidráulicas en las que se extremen las medidas de limpieza.
- Alta presión: exige un buen mantenimiento.
- Precio: las bombas, motores, válvulas proporcionales y servo válvulas son caras.
- Problemas mecánicos y de pérdidas de fluido.
- Anomalías debido a la compresibilidad del aceite y a la elasticidad del sistema.

Las partes esenciales de un sistema oleodinámico se describen a continuación:

- Fluido Hidráulico
- Acumulador
- Filtros
- Bomba
- Motor eléctrico
- Válvula de seguridad
- Manómetro
- Bloque de válvulas
- Válvulas auxiliares:
 - Válvulas de regulación
 - Válvulas de descarga
 - Reguladores de caudal
 - Antirretornos

- Cilindros

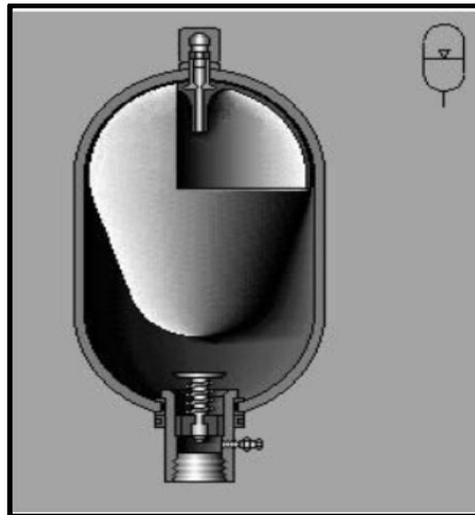
Es muy común encontrar este conjunto de elementos formados por el depósito, la bomba, motor, el filtro, la válvula de seguridad, el manómetro y por supuesto el fluido. En general se dividen en tres grupos según la presión de trabajo:

- Pequeña presión: de 0 a 50 bar
- Media presión: de 50 a 150 bar
- Alta presión: desde 150 bar

Acumuladores: a diferencia de los gases, los fluidos utilizados en los sistemas hidráulicos no pueden ser comprimidos y almacenados para su utilización en cualquier momento o lugar.

El acumulador es un dispositivo por medio del cual se puede almacenar y suministrar fluidos incompresibles bajo presión o no. En el caso a presión, esto se consigue cuando el fluido hidráulico bajo presión entra en la cámara del acumulador y hace una de las tres siguientes acciones: comprime un muelle, comprime un gas o eleva un peso.

Figura 24. **Acumulador**



Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

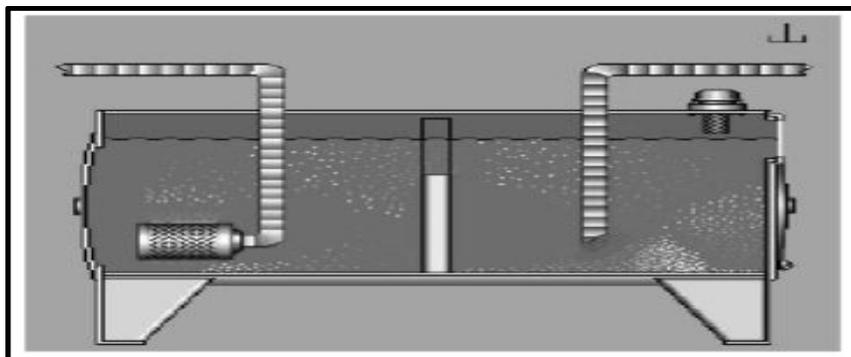
Depósitos. Su función principal es acondicionar el fluido, es decir, proporcionar el espacio suficiente para guardar todo el fluido del sistema más una reserva, manteniendo el fluido limpio a una temperatura de trabajo adecuada.

El fluido se mantiene limpio mediante el uso de filtros, coladores e imanes según lo requieran las condiciones medioambientales. La temperatura adecuada de trabajo se logra con un diseño acorde del sistema hidráulico con la utilización de intercambiadores de calor.

Los proyectos de sistemas hidráulicos industriales tienen una ventaja sobre los sistemas aeronáuticos o el de equipos móviles. Esta ventaja se basa en la gran flexibilidad y en el diseño del depósito, prácticamente sin problemas de situación o de dimensiones.

En primer lugar, el depósito sirve de almacenamiento para el fluido requerido por el sistema. El depósito también debe tener espacio para que el aire pueda separarse del fluido y debe permitir igualmente que los contaminantes sedimenten. Además, un depósito bien diseñado debe disipar el calor generado en el sistema. Es siempre deseable un tamaño grande del tanque para facilitar el enfriamiento y la separación de los contaminantes, como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 25. **Depósito**

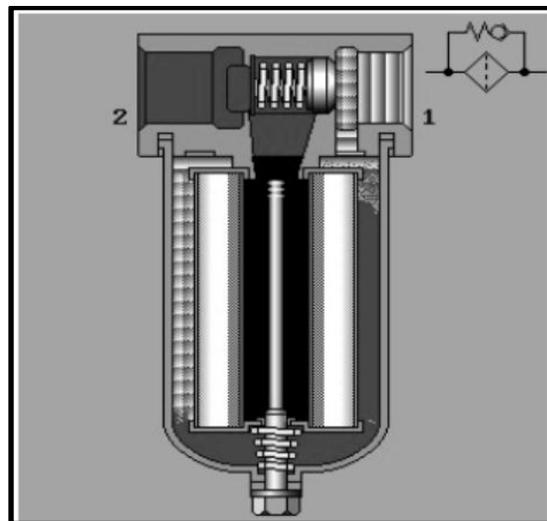


Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

Filtro. Su función principal es la de retener partículas y contaminantes insolubles en el fluido, mediante el uso de un material poroso. De esta manera, se consigue alargar la vida útil de la instalación, debido a que se trabaja con un fluido limpio y no contaminado, existen diversos tipos de filtros los cuales se señalarán a continuación:

- Ambiente: 25 micras – papel celulósico.
- Aspiración: 100, 160 y 270 micras – superficie, malla bronce fosforoso, espiral magnética y captadores magnéticos.
- Presión: 3 – 50 micras – superficie, malla bronce fosforoso, resinas especiales y malla acero inoxidable.
- Retorno: 10 -160 micras – superficie, papel micronic, discos lenticulares, malla bronce fosforoso, espiral magnética, profundidad, filtros magnéticos, absorción, lana vidrio y algodón.

Figura 26. **Filtro**



Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

Bombas. Son los elementos que transforman la energía mecánica en energía hidráulica. Se fabrican en diversos tamaños y con muchos sistemas diferentes de bombeo. Las bombas se clasifican en dos categorías básicas: hidrodinámicas e hidrostáticas.

Las bombas hidrodinámicas se caracterizan porque el líquido, que es tomado de un depósito, es puesto primero en movimiento dentro de la bomba, a una velocidad considerable, experimentando luego una disminución de velocidad que permite adquirir presión, venciendo así las resistencias. Una de las características más importantes en este tipo de bombas, es la dependencia funcional entre el volumen suministrado y la presión.

En este tipo, las bombas centrífugas son las más conocidas. En ellas, el fluido entra por el centro del cuerpo y es expulsado hacia el exterior por medio de un rotor que gira rápidamente. No existe ninguna separación entre los orificios de entrada y salida del líquido. La presión alcanzada depende de la velocidad y del tamaño del rotor.

Las bombas hidrostáticas también llamadas volumétricas, se caracterizan porque el líquido adquiere la presión sin que el interior de la bomba experimente ningún aumento considerable de velocidad, ya que únicamente es aspirado y transportado. El caudal suministrado no depende sensiblemente de la presión, lo que las hace muy adecuadas para la transmisión de potencia.

Tuberías y racores. Para conectar entre sí los distintos elementos que integran una instalación hidráulica se usan dos tipos de tubos esencialmente diferentes: rígidos y flexibles.

Las tuberías rígidas son tubos de acero que soportan altas presiones, Se obtienen por estirado y recocidos sucesivos, lo cual les confiere suficiente plasticidad para permitir su deformación.

También podría emplearse el cobre a estos efectos, pero ejerce una acción catalítica sobre el aceite que acelera el envejecimiento del mismo. Los tubos empleados presentan una superficie interior muy lisa y regular y un diámetro exterior con tolerancias constructivas muy reducidas, lo cual permite realizar las uniones entre dos tramos consecutivos de tubo por medio de los llamados racores sin soldadura. Una de las grandes ventajas de las instalaciones hidrostáticas es su facilidad de montaje, a la cual contribuye notablemente la ausencia de uniones soldadas.

No obstante, todavía se recurre, consecuentemente, a las uniones por medio de bridas soldadas a las tuberías. Las tuberías flexibles se usan para alimentar aquellos órganos receptores que modifican su posición respecto a los demás durante su funcionamiento, o bien cuando el uso de tuberías rígidas no resulta aconsejable por la presencia de vibraciones debidas al funcionamiento. Estas tuberías soportan valores elevados de presión, pueden flexionarse fácilmente, incluso por la acción de pequeños esfuerzos y permiten las más diversas conformaciones.

Según la presión que tengan que soportar, se fabrican distintos tipos. El número de mallas determina su capacidad. Para su unión con los demás órganos, las tuberías flexibles permiten la colocación en sus extremos de manguitos terminales roscados o a presión. Para obtener uniones provisionales, incluso en presencia de presión, existen juntas rápidas especiales que permiten enlazar una tubería flexible a un aparato o a otra tubería sometida a presión.

2.3. Válvulas oleodinámicas

Las necesidades crecientes que se presentarán y que se siguen presentando en el campo de la automatización industrial en cuanto a la fabricación de maquinarias, dispositivos y diversos elementos accionados oleodinámicamente y la extrema sencillez con que se pueden diseñar circuitos eléctricos que funcionan automáticamente comandados desde sencillos micro contactos, finales de carrera, micro contactos temporizadores, hasta los modernos controladores lógicos programables, han hecho pensar a los ingenieros proyectistas, hace algunas décadas, lo útil que resultaría comandar circuitos hidráulicos vía automatizaciones eléctricas.

Ello determinó la creación de la válvula de control direccional accionada por solenoides y actualmente, este tipo de válvulas es el elemento indispensable para comandar cualquier máquina hidráulica, por medio de cualquier tipo de accionamiento eléctrico o electrónico. Las válvulas que a continuación se detallan, son las más populares en el campo de válvula de control direccional de flujos hidráulicos accionados eléctricamente.

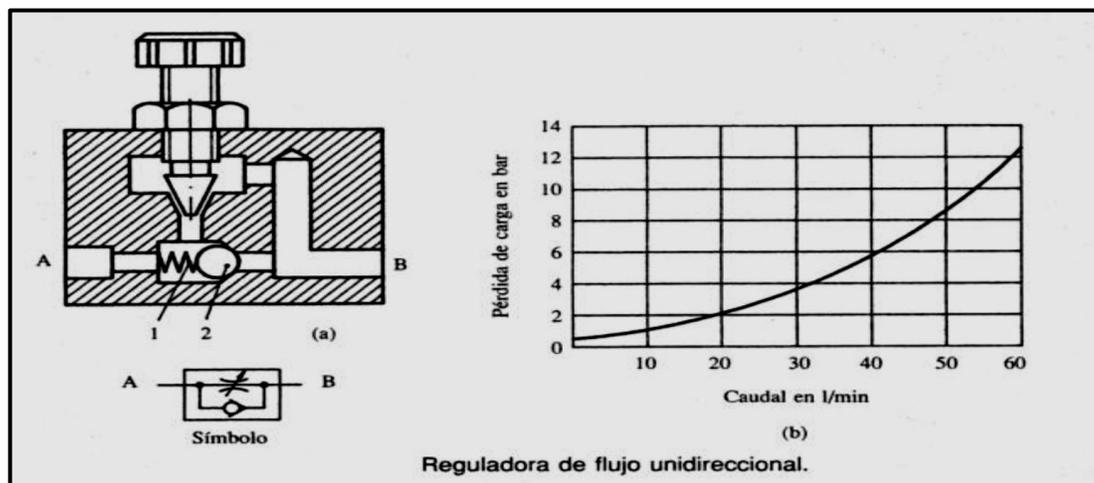
- Las válvulas reguladoras de caudal: se utilizan para regular la velocidad del actuador. Esta depende de la cantidad de aceite que se le envía por unidad de tiempo. Es posible regular el caudal con una bomba de desplazamiento variable, pero en muchos circuitos es más práctico utilizar una bomba de desplazamiento fijo y regular el caudal con una válvula reguladora de caudal.

Existen tres métodos básicos para aplicar las válvulas reguladoras de caudal para controlar la velocidad del actuador, ellas son: regulación a la entrada, regulación a la salida y regulación por substracción.

Una válvula reguladora de caudal es colocada en el puerto de salida de un actuador, regula el caudal que descarga el actuador.

Este circuito con descarga regulada proporciona un control positivo de la velocidad de los actuadores en operaciones de barrenado, corte, fresado y descarga. De hecho, este circuito, es muy popular para regular el caudal en aplicaciones hidráulicas industriales.

Figura 27. **Válvula reguladora de caudal**

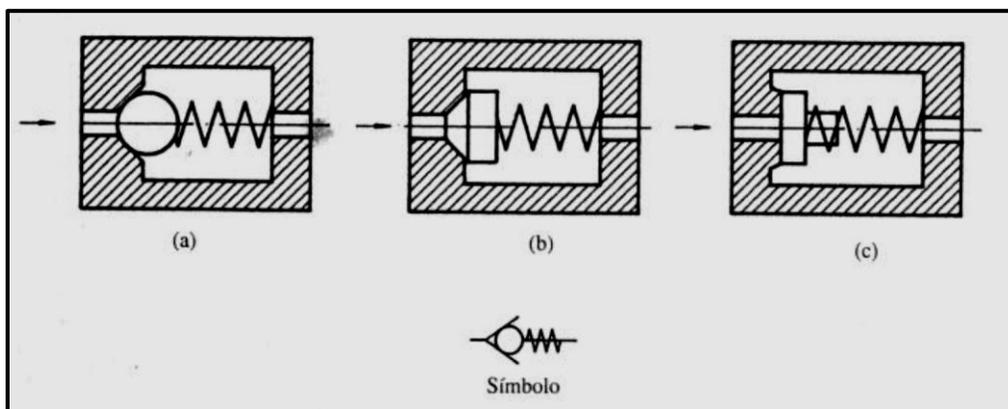


Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

- Las válvulas *check* o antirretorno: tienen como propósito permitir el flujo en un solo sentido, su aplicación principal es en la descarga de bombas. Su función es prevenir que el flujo bombeado regrese una vez que las bombas se detienen; también evitan que el flujo de retorno provoque un giro inverso de las bombas, lo cual puede, en algunos casos, dañar los equipos de bombeo.

Las válvulas antirretorno que contienen resortes o mecanismos internos susceptibles a interceptar sólidos, no pueden utilizarse en aplicaciones de aguas residuales y su uso se limitan a proyectos de agua potable o aguas crudas.

Figura 28. **Válvula antirretorno**

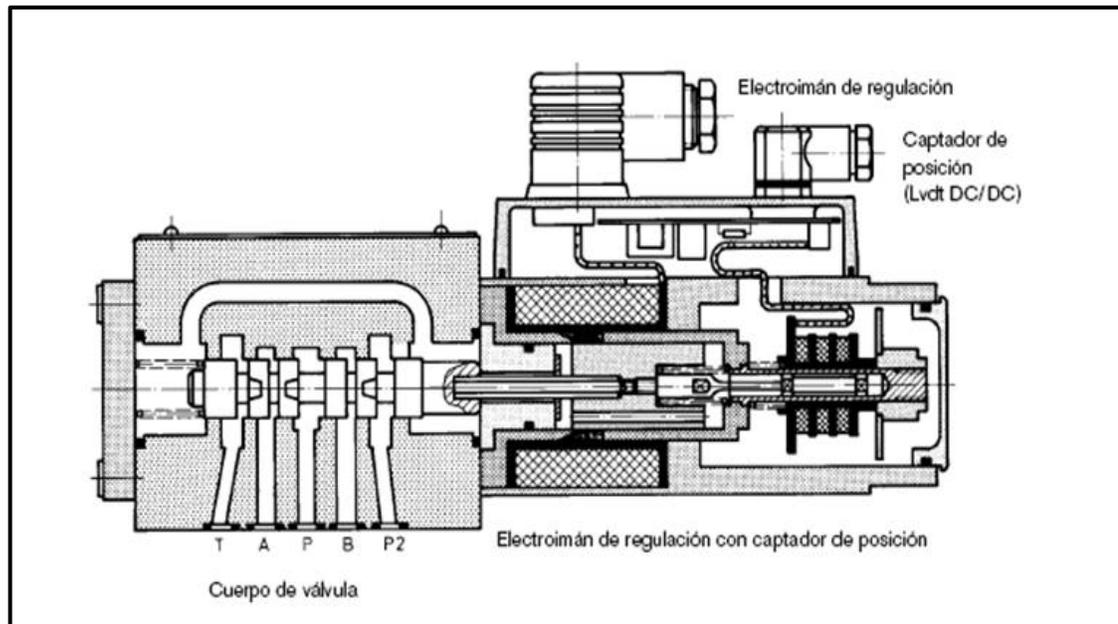


Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

- Válvulas proporcionales. Este tipo de válvulas proporcionales se pueden emplear, bien en caudales o de presiones. Es aquella en la que una magnitud física del fluido, a la salida de la válvula es proporcional a una señal eléctrica analógica de entrada $X = KV$ donde X es presión o caudal; K una constante de proporcionalidad y V es la señal analógica de tensión continua que se introduce en la válvula.

No se alimentan las válvulas con 0 V o 24 V, como en las válvulas convencionales, sino que se hace con una señal que puede variar en un rango determinado, por ejemplo, de 0 a 10 V. De esta forma, se obtienen valores intermedios de presión o caudal. A diferencia de las válvulas convencionales.

Figura 29. **Válvula proporcional**

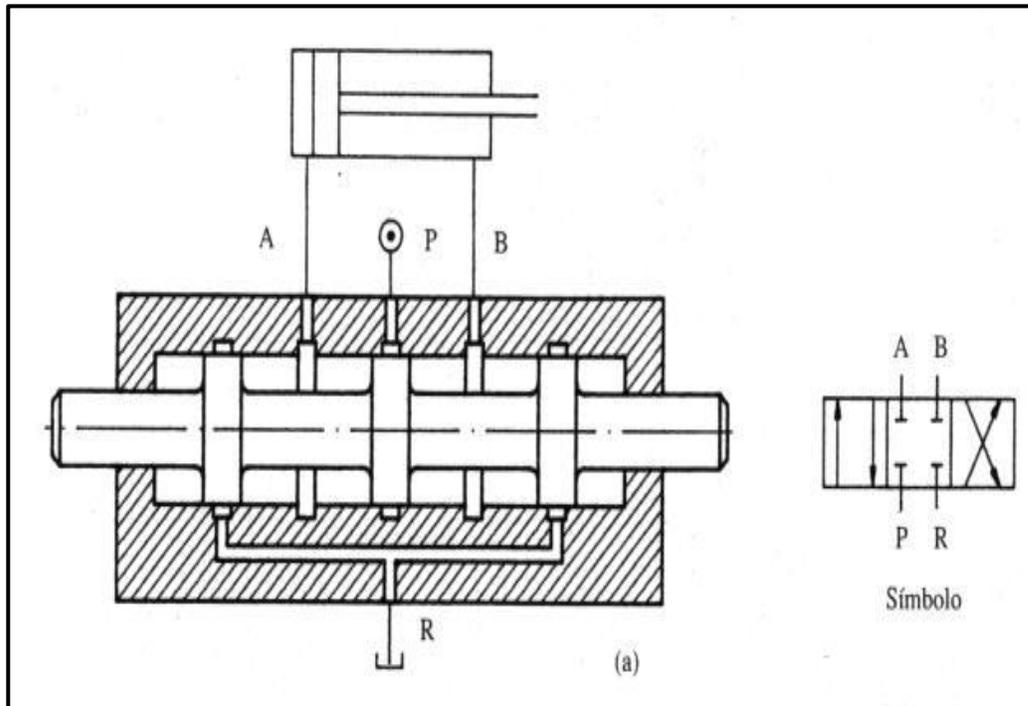


Fuente: PARDOS, José. *Hidráulica proporcional*. www.seas.es. Consulta: enero de 2017.

- Válvula de control direccional. Un control de válvulas direccional, direcciona el suministro de aceite a un actuador. Un control de válvulas consiste en un cuerpo o carcasa con pasajes internos, los cuales están conectados y diseccionados por un carrete de válvulas movable. Dentro de las válvulas están los carretes de válvulas. El carrete de válvula consiste de una superficie con surcos.

En la superficie del *block* el aceite fluye a través del cuerpo de la válvula, mientras los surcos o anillos permiten que el aceite fluya alrededor del carrete y por el cuerpo de la válvula. Hay dos tipos básicos de válvulas de control direccional: válvulas centrales abiertas y válvulas centrales cerradas.

Figura 30. **Válvula de control direccional**



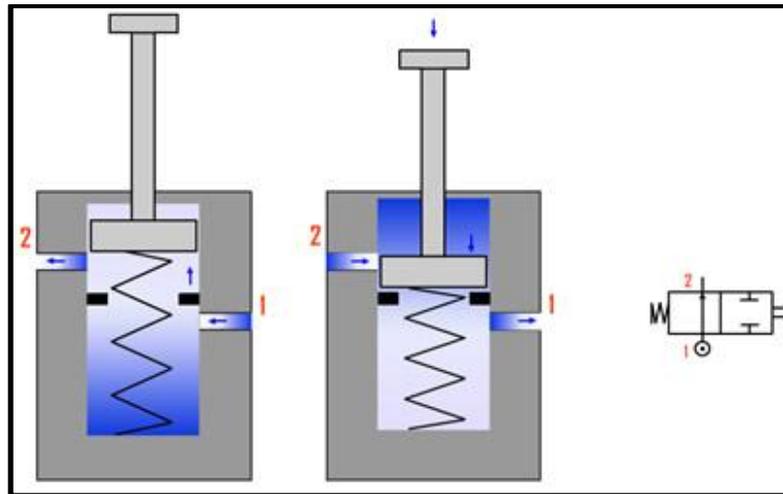
Fuente: DELNERO, Juan. *Oleohidráulica*. www.aero.ing.unlp.edu.ar. Consulta: diciembre de 2016.

- Válvulas centrales abiertas. Permiten que el aceite fluya a través de la válvula todo el tiempo. En la posición neutral, el pasaje centralmente abierto permite al aceite fluir desde el sumidero hacia el actuador. El aceite retorna desde el actuador fluyendo a través de la válvula hacia el tanque. La válvula puede cambiar en la dirección opuesta, permitiendo a este suministrando a lado opuesto del actuador. Los sistemas hidráulicos centralmente abiertos siempre están suministrando un flujo relativamente alto. Esto permite que el sistema hidráulico responda rápidamente cuando la válvula esta cambiada.

Entre sus ventajas está la respuesta rápida y entre las desventajas sobresalen: causa el cambio parcial del flujo hacia el tanque y el actuador, los cuales generan más calor; no puede ser controlado con precisión y finalmente, requiere una enfriado de aceite grande.

- Válvulas centrales cerradas: las válvulas centrales cerradas operan similarmente a las válvulas centrales abiertas, excepto en posición neutral. Las válvulas centrales cerradas bloquean el flujo.

Figura 31. **Válvulas centrales abiertas y cerradas**



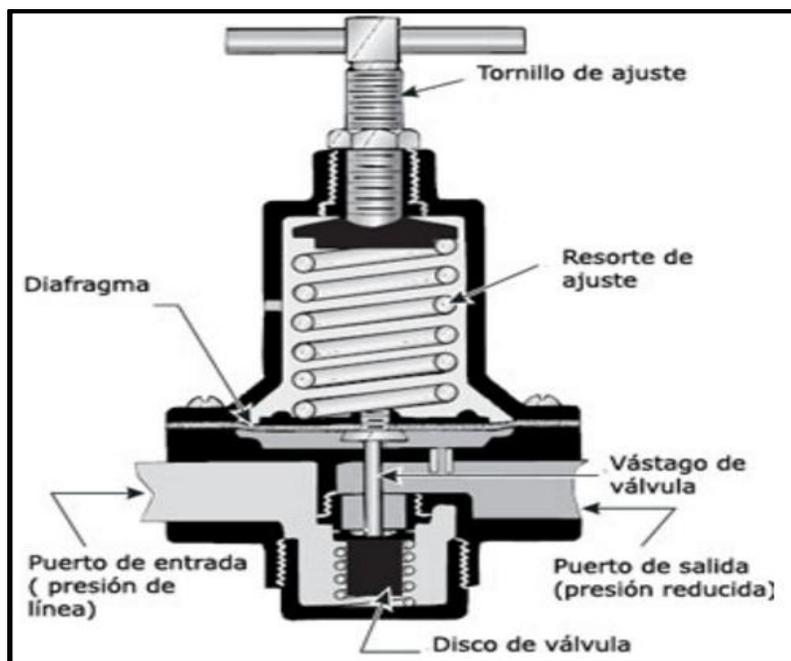
Fuente: www.neumaticar.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de control de presión. Estas válvulas desempeñan diferentes funciones, como limitar la presión máxima del sistema o regular la reducción de presión en ciertas partes del circuito, y en otras funciones donde su actuación es el resultado del cambio de la presión operante. Su funcionamiento es basado en el balance de la presión y la fuerza del resorte.

La mayoría tiene infinidad de posiciones, es decir, que las válvulas pueden tomar varias posiciones, de completamente cerrado o completamente abiertas, dependiendo del porcentaje de flujo y las diferencias de presiones.

Se denomina controles de presión por su función principal, así como la válvula de alivio, válvula de secuencia, válvula de drenaje, entre otros.

Figura 32. **Válvula de control de presión**

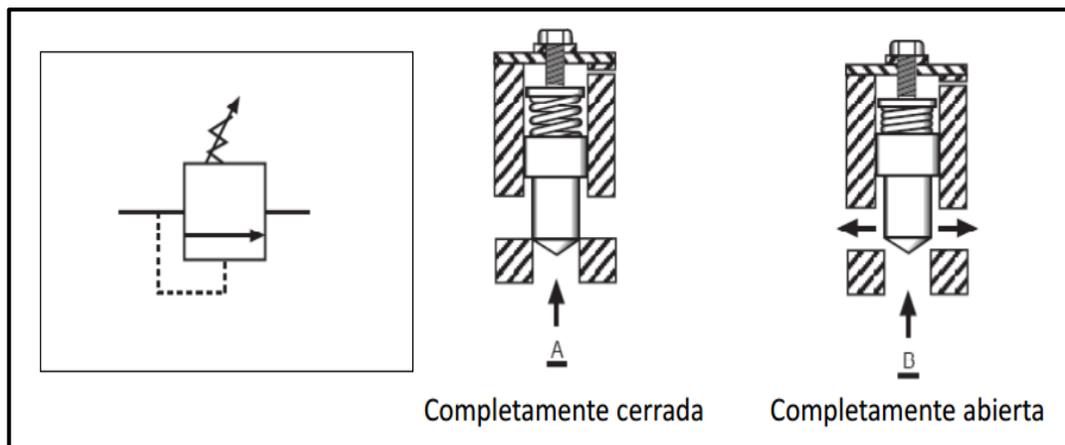


Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de seguridad: también llamadas de alivio limitan la presión del circuito, para protegerlo o para reducir la fuerza o el par ejercido por un cilindro o por un motor rotativo. Suelen ser ajustables, como la

representada en la figura siguiente graduando con un tornillo superior la presión del resorte. Si la presión excede el valor establecido se levanta la bola y la línea se pone por el conducto de la derecha en comunicación con el tanque de aceite. Hay, esencialmente, tres tipos de válvulas de seguridad: de acción directa, diferenciales y de piloto o válvulas compuestas de alivio.

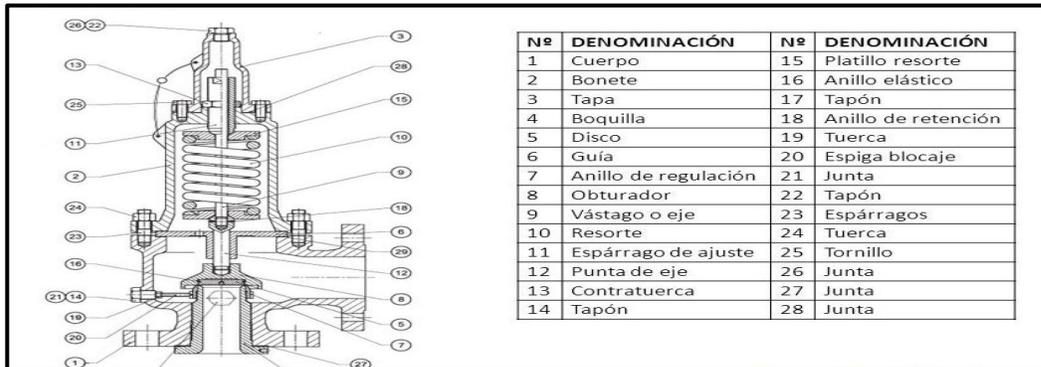
Figura 33. **Válvula de seguridad**



Fuente: GAONA, Karla. *Mecatrónica*. www.karlagaona.blogspot.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvula de alivio de acción directa. Una válvula de este tipo se prefiere, generalmente, en circuitos de baja presión o cuando los sistemas no se esperan que alcancen frecuentemente las condiciones de la válvula de alivio. Debido a la presión de la línea principal actuando directamente en el resorte, se requiere que estos sean pesados, lo cual produce oscilación y fluctuaciones de presión, debidos al rápido cierre y apertura de la compuerta de la válvula.

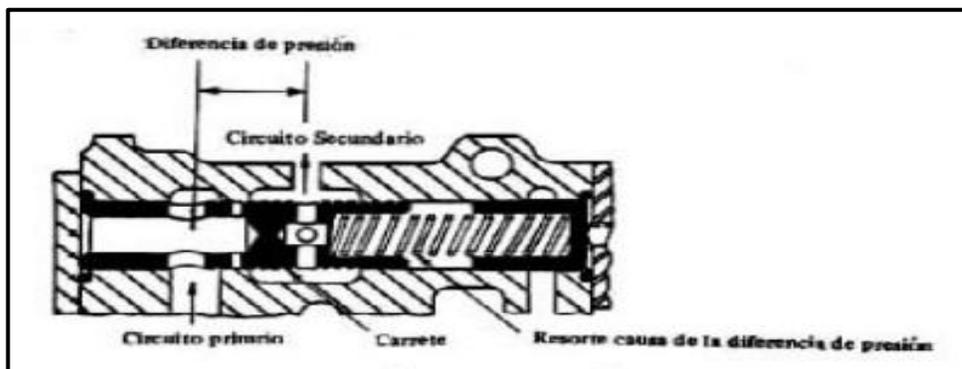
Figura 34. Válvula de alivio de acción directa



Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvula de alivio diferencial. Esta se caracteriza porque aun cuando la presión de la línea principal actúa contra los resortes de la válvula, solo un área diferencial es presentada a la presión. Una válvula de este tipo requiere un resorte considerablemente más débil que el que requieren las de acción directa.

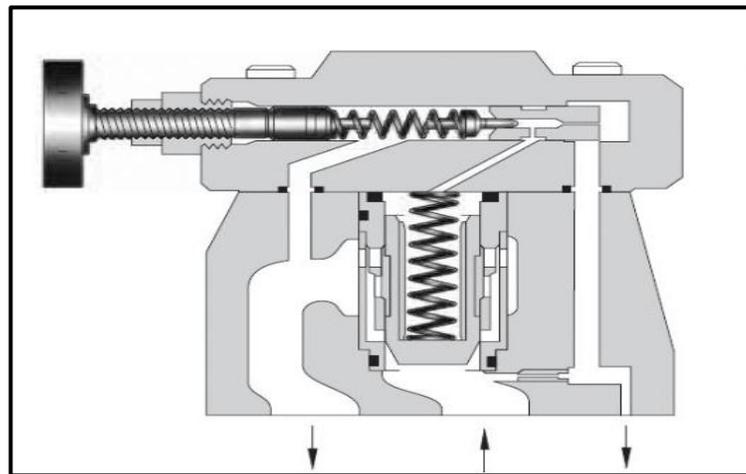
Figura 35. Válvula de alivio diferencial



Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

Las válvulas de este tipo tienen una válvula de alivio piloto de tamaño pequeño, incorporada al alojamiento principal, que abre cuando la presión de la línea principal alcanza el ajuste del resorte. La válvula abierta permite que el fluido contenido en una cámara de balanceo que se abre a la línea principal por una restricción fija logre desahogarse. Esta acción crea una fuerza desbalanceada en la válvula de alivio principal, lo cual hace que opere la válvula de alivio de la línea principal.

Figura 36. **Válvula de alivio operada por piloto**

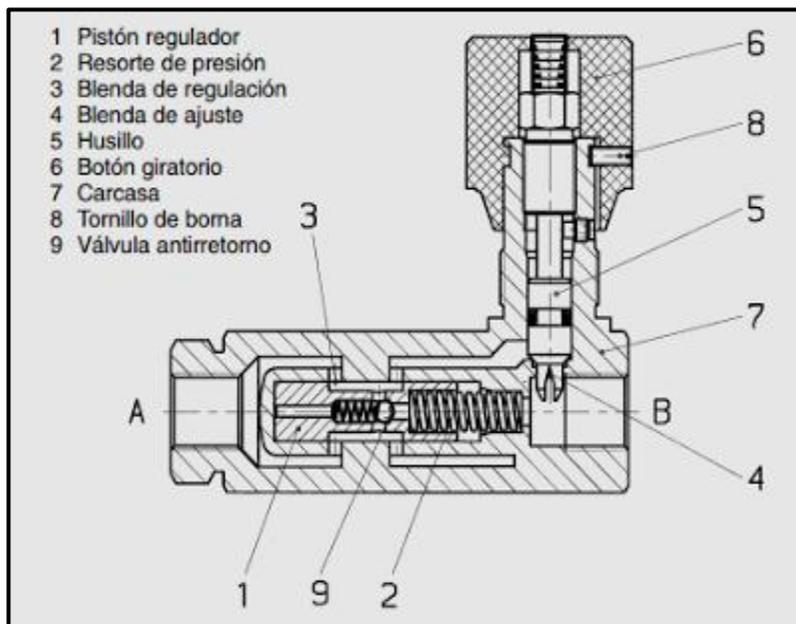


Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas reductoras de presión: tienen por objeto limitar la presión en una rama de un circuito a un valor inferior a la presión de trabajo del circuito principal. Permiten que un mismo sistema trabaje a dos presiones con la consiguiente economía en los componentes de baja presión. El funcionamiento de este tipo de válvulas puede verse en el modelo que lleva dos resortes, uno más fuerte en la parte superior y otro más débil en la base.

Este último solamente sirve para mantener el émbolo en posición. El líquido entra en la válvula, según se indica en la figura. Desde la línea de alta presión, fluye por debajo y alrededor de la parte estrecha del émbolo y sale por el otro lado de la válvula a la línea de baja presión. La alta presión de la entrada actúa hacia arriba en la superficie inferior del émbolo en a y hacia abajo en la superficie lateral de la válvula b. Estas superficies son tales, que ambas fuerzas se equilibran, con lo que la acción de la válvula es independiente de la presión en la línea de entrada. Esta válvula mantiene una presión constante a la salida, aunque la presión en la línea de entrada sea fluctuante.

Figura 37. **Válvula reductora de presión**



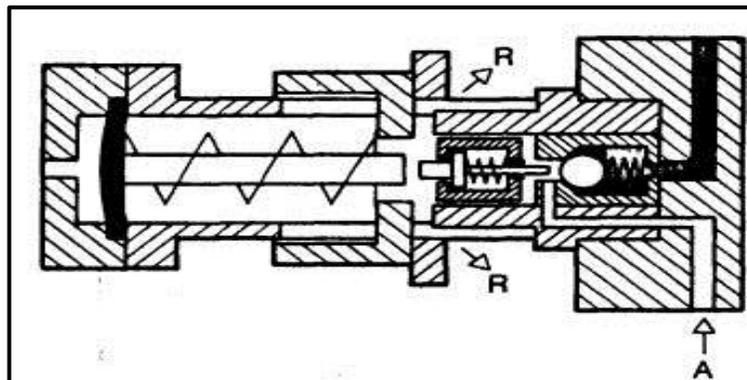
Fuente: GAONA, Karla. *Mecatrónica*. www.karlagaona.blogspot.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de secuencia. Controlan la sucesión de operaciones entre dos ramas de un circuito, por ejemplo, para que el cilindro que aplica la

herramienta a la pieza comience su carrera, solo cuando el cilindro que amordaza la pieza haya terminado la suya. Estas válvulas tienen una entrada de presión y dos salidas: una normalmente abierta y la segunda obstruida por la compresión regulable del resorte.

La presión de control requerida para que la válvula actúe puede ser por presión en la puerta de entrada o por presión remota en alguna otra parte del sistema para invertir el flujo a través de la misma. Existe solo el procedimiento de proporcionar válvulas de *check* integrales o externas. Todas las válvulas de secuencia deben tener drenes externos para sus resortes porque la presión de salida no puede actuar sobre el vástago de la válvula, de otro modo una presión baja no podría acumular o aumentarse hasta el valor pleno de la presión de entrada de la válvula.

Figura 38. **Válvula de secuencia**



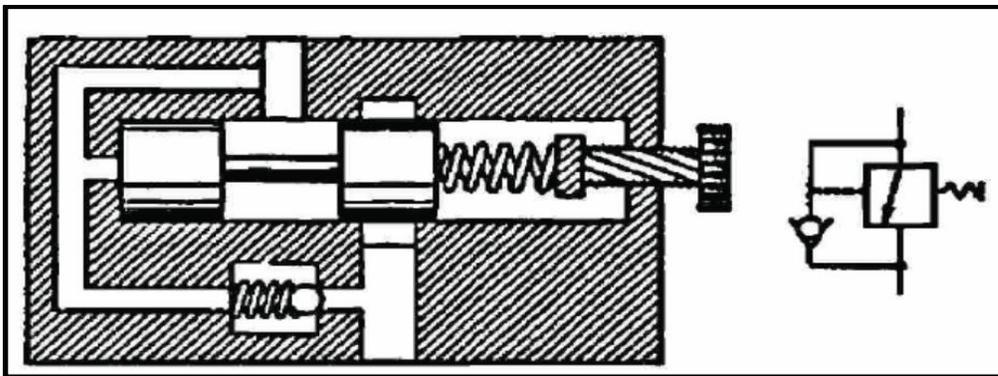
Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de pie, de presión inversa, o de contrabalanceo. Son muy similares a una válvula de secuencia con una válvula de *check* integral. Esta válvula permite que el flujo libre del fluido en una dirección y lo

restringe en la dirección opuesta. La válvula puede ser operada directamente o a control remoto por presión, dependiendo de su diseño. Esta válvula es comúnmente usada para prevenir que el pistón, montado verticalmente en el cilindro, descienda debido al peso de la carga. El peso de la carga es contrabalanceado por la presión inversa en el pistón, creada por el resorte de ajuste de la válvula de contrabalanceo.

Estas válvulas se usan también para cargar hidráulicamente un cilindro y simular condiciones externas de carga en la barra del pistón. Dependiendo de las aplicaciones específicas, una válvula de contrabalanceo, puede ser drenada interna o externamente.

Figura 39. **Válvula de secuencia con una válvula de *check* integral**



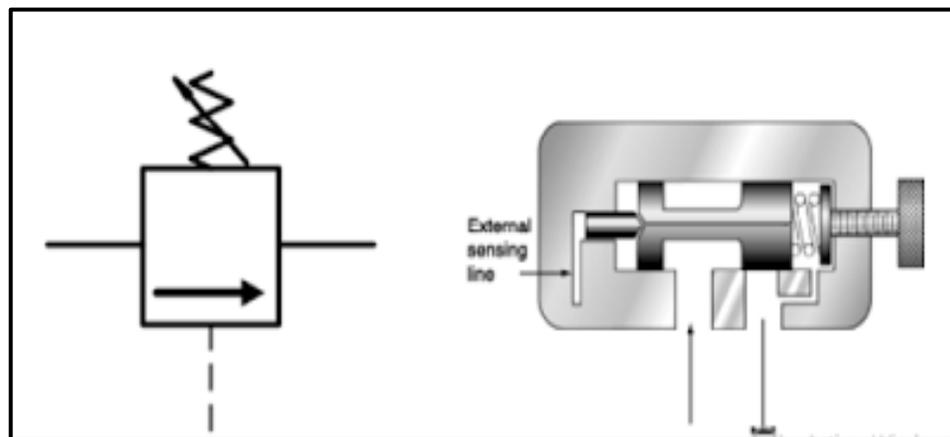
Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de descarga. Tales válvulas se usan para que una bomba levante presión hasta el ajuste, y entonces descargue el fluido para vaciarlo en el tanque a prácticamente cero presiones, mientras que la presión del piloto es mantenida en la válvula, desde una fuente remota.

Cuando una válvula de alivio descarga una bomba, el sistema es relevado de presión, lo que hace que la bomba requiera máxima potencia. Cuando la presión del piloto puede mantenerse en una válvula de descarga, la bomba no está desarrollando presión y, por lo tanto, se necesita un mínimo de presión para mover la bomba. Un ejemplo de la válvula de descarga se muestra en la figura siguiente.

Tales válvulas son comúnmente usadas en sistemas de bombas dobles, donde una de alto volumen es descargado a su presión límite, mientras que la de alta presión y bajo volumen, continúa para levantar mayor presión al sistema.

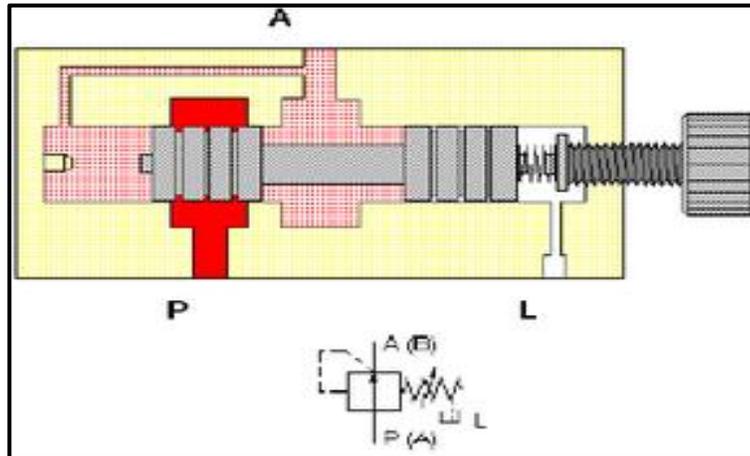
Figura 40. **Válvula de descarga**



Fuente: GAONA, Karla. *Mecatrónica*. www.karlagaona.blogspot.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvulas de doble vía reguladoras de presión. Estas reducen la presión de entrada en doble vía hasta alcanzar el valor de una presión de doble salida previamente ajustada. Estas válvulas solo cumplen debidamente su función si el sistema hidráulico trabaja con diversas presiones.

Figura 41. **Válvula reguladora de presión de 2 vías**

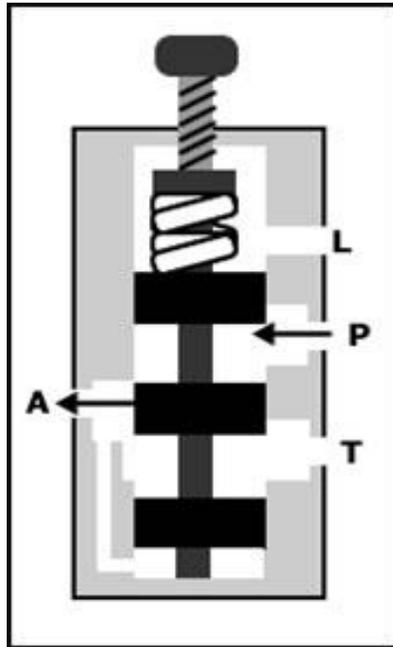


Fuente: *Hidráulica*. www.sitioniche.nichese.com. Consulta: enero de 2017.

- Válvula de 3 vías reguladoras de presión. Estas se refieren a las características del flujo a través de P y A. El funcionamiento de la válvula de 3 vías es idéntico al de la válvula de 2 vías. Sin embargo, la válvula de 3 vías provoca un desplazamiento adicional del émbolo al aumentar la presión en la salida A por encima del valor ajustado.

Las características de regulación de la válvula de 3 vías son determinadas por el perfil de sobreposición del émbolo.

Figura 42. **Válvula reguladora de presión de 3 vías**



Fuente: *Hidráulica*. www.sitioniche.nichese.com. Consulta: enero de 2017.

2.4. Simbología oleodinámica

Para la interpretación correcta de los diagramas o planos en oleodinámica, es muy importante conocer los diferentes tipos de símbolos utilizados en los mismos. Los símbolos pictóricos se utilizan para mostrar la interconexión de componentes. Son los símbolos de algunas de las normas básicas para representar las diferencias de estandarizar para el funcionamiento básico.

Símbolos recortados. Se enfocan en la construcción. Son símbolos complejos en su forma de dibujar y las funciones no son aparentes.

Los símbolos gráficos deberían ser usados en conjunto con los símbolos de otros sistemas. Todos los símbolos son aquellos que dan una representación simbólica de los componentes y todos los detalles de un circuito. Los símbolos compuestos usualmente representan un componente complejo.

Las formas elementales de símbolos son: círculos, triángulos, líneas, cuadrados, arcos, puntos, rectángulos, flechas, cruces.

Los símbolos utilizan palabras o abreviaciones. En la industria, los símbolos más comunes son los símbolos gráficos en los diagramas hidráulicos, utilizándose formas geométricas sencillas que indican las funciones e interconexiones de las líneas y componentes oleodinámicos.

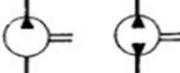
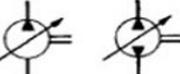
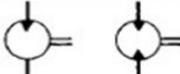
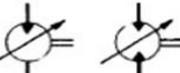
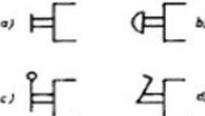
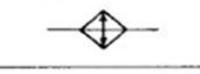
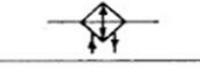
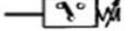
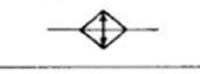
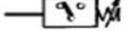
A continuación, se muestra una tabla donde se presenta el tipo de Norma y su respectiva descripción.

Tabla II. **Norma para símbolos oleodinámicos**

Norma	Descripción
UNE 101-101-85	Gama de presiones.
UNE 101-149-86	Símbolos gráficos.
UNE 101-360-86	Diámetros de los cilindros y de los vástagos de pistón.
UNE 101-362-86	Cilindros gama básica de presiones normales.
UNE 101-363-86	Serie básica de carreras de pistón.
UNE 101-365-86	Cilindros. Medidas y tipos de roscas de los vástagos de pistón.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Simbología oleodinámica

SIMBOLO	DENOMINACION	SIMBOLO	DENOMINACION
	Tubería de carga rígida		Motor monofásico de corriente alterna
	Tubería flexible		Motor trifásico de corriente alterna
	Cruce de tuberías con unión		Motor térmico
	Cruce de tuberías sin unión		Bomba de caudal constante a) Un sentido del flujo b) Doble sentido de flujo
	Tubería de maniobra (pilotaje)		Bomba de caudal variable a) Un sentido del flujo b) Doble sentido del flujo
	Derivación tapada (cerrada)		Bomba de accionamiento manual
	Recipiente para fluido hidráulico		Motor hidráulico a) Un sentido del flujo b) Doble sentido del flujo
	Recipiente para fluido hidráulico a presión		Motor hidráulico de caudal variable a) Un sentido del flujo b) Doble sentido del flujo
	Escape al aire		Motor hidráulico oscilante con ángulo de rotación limitado
	Acumulador hidráulico		Accionamientos a) Mecánico b) Pulsador c) Leva d) Pedal
	Filtro (símbolo general)		Intercambiador de calor. Calentador
	Filtro con purga		Intercambiador de calor. Refrigerador
	Manómetro		Intercambiador de calor. Refrigerador líquido
	Intercambiador de calor. Calentador		Presostato
	Intercambiador de calor. Refrigerador		Llave de paso
	Presostato		

Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

Continuación de tabla III.

SIMBOLO	DENOMINACION	SIMBOLO	DENOMINACION
	<p>Válvulas de secuencia.</p> <p>Permiten e impiden el paso de caudal entre dos puntos de un circuito mediante pilotaje interno o externo.</p> <p>a) Pilotaje interno b) Pilotaje externo c) Con retención</p>		<p>Accionamiento o pilotaje de válvulas distribuidoras</p> <p>a) Por pulsador en un sentido y retorno por resorte b) Por accionamiento mecánico y retorno por resorte c) Por palanca manual y enclavamiento mecánico d) Por electroimán y retorno por resorte e) Por aire y retorno por resorte f) Por fluido hidráulico y retorno por resorte g) Por electroimán para las dos posiciones. Queda en el último pilotaje (biestable). h) Por aire para las dos posiciones. i) Por electroimán para las dos posiciones extremas. Al faltar pilotaje vuelve al centro. j) Por palanca manual. Representado en posición centro. k) Por electroimán y manualmente. En reposo, posición centro.</p>
	<p>Válvulas de contrapresión.</p> <p>Estas válvulas originan una contrapresión a la salida de un actuador, que deberá ser vencida para que ésta pueda moverse.</p> <p>a) Pilotaje interno b) Pilotaje externo c) Con retención</p>		<p>Cilindros hidráulicos</p> <p>a) De simple efecto b) De simple efecto. Retorno por resorte c) De doble efecto d) De doble efecto. Doble vástago.</p>
	<p>Válvulas distribuidoras</p> <p>a) 2 posiciones (2p) 2 vías (2v) b) 2p - 3v c) 2p - 4v d) 3p - 4v e) 3p - 4v f) 3p - 4v g) 3p - 4v h) 3p - 4v</p>		

Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

Las tuberías, tubos y pasos hidráulicos se trazan como simples líneas dependiendo del tipo de tubería es el tipo de línea.

- Línea de trabajo _____
- Línea de pilotaje _____
- Línea de drenaje - - - - -

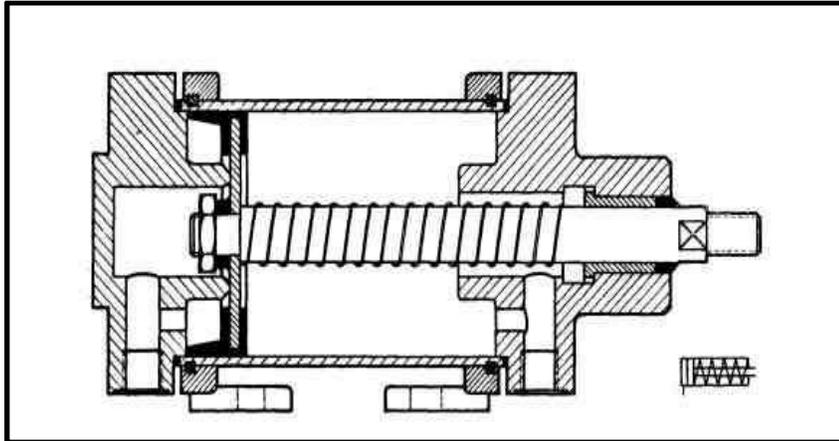
Componentes rotativos: un círculo es el símbolo básico de los componentes rotativos las fuentes de energía se muestran con triángulos indicando la dirección de la energía.

2.5. Actuadores oleodinámicos

El cilindro de simple efecto solo puede realizar trabajo en un único sentido, para que el vástago avance. El aceite a presión penetra por el orificio de la cámara trasera, la llena y hace avanzar al vástago. Para que esto sea posible, el aceite de la cámara delantera ha de ser desalojado al exterior a través del orificio correspondiente. Para el retorno, el cilindro cuenta con un muelle recuperador que lleva incorporado el cilindro, o bien mediante la acción de fuerzas exteriores.

En la práctica existen varios tipos. Los más empleados son los cilindros de émbolo. El movimiento de trabajo lo realiza el aceite a presión que obliga a desplazar al émbolo comprimiendo el muelle y, al desaparecer la presión, el muelle retorna al émbolo a su posición original. Por eso, los cilindros de simple efecto se utilizan cuando el trabajo debe realizarse en una sola dirección.

Figura 43. **Cilindro de simple efecto**

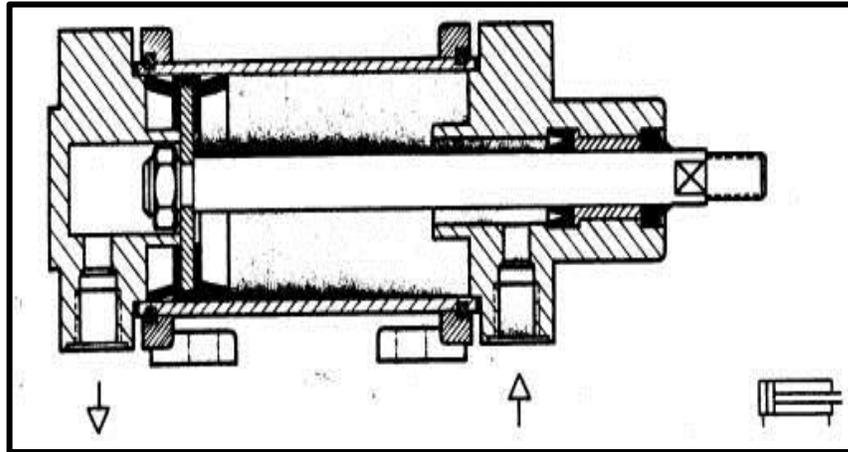


Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

El cilindro de doble efecto se puede mover en dos direcciones en función de por dónde le entre el aceite al cilindro y por donde lo expulse. Así el cilindro tiene la habilidad de ejercer un trabajo en los dos sentidos del movimiento. El campo de aplicación de los cilindros de doble efecto es más extenso que el de los cilindros de simple efecto. Incluso si no es necesario ejercer una fuerza en los dos sentidos, el cilindro de doble efecto es preferible, que el cilindro de simple efecto con muelle de retorno.

El cilindro de doble efecto se construye siempre en forma de cilindro de émbolo y posee dos tomas para el aceite situados a ambos lados del émbolo. Al aplicar aceite en la cámara posterior y comunicar la cámara anterior con la atmósfera a través de una válvula, el cilindro realiza la carrera de avance. La carrera de retroceso se efectúa introduciendo aceite a presión en la cámara anterior y comunicando la cámara posterior con el depósito, para que el aceite atrapado en esa cámara salga y permita el desplazamiento.

Figura 44. **Cilindro de doble efecto**



Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

2.6. **Mantenimiento**

El proceso de mantenimiento son trabajos que se deben ejecutar en algún equipo o planta para conservarlo y proporcione el servicio para el que fue diseñado o para el que fue adquirido por la empresa, ya que para muchas de estas el objetivo del mantenimiento es la conservación del servicio que están suministrando los equipos, mismo que puede ser crucial para la continuación de ciertos procesos industriales.

En el siguiente apartado se describirán los aspectos teóricos y generales del mantenimiento, partiendo de los antecedentes, objetivos, tipos y pasos del proceso de mantenimiento. Pues el mantenimiento es todo un proceso que va incluido en la planeación estratégica de toda empresa y enlazado directamente con el proceso de operaciones.

2.6.1. Objetivos del mantenimiento

El objetivo principal del mantenimiento es asegurar la disponibilidad planeada al menor costo dentro de las recomendaciones de garantía y uso de los fabricantes de los equipos e instalaciones y normas de seguridad. Es decir, contar con las instalaciones en óptimas condiciones en todo momento, para asegurar una disponibilidad total del sistema en todo su rango de desempeño, lo cual está basado en la ausencia de errores y fallas. El mantenimiento debe asegurar la competitividad de la empresa por medio de:

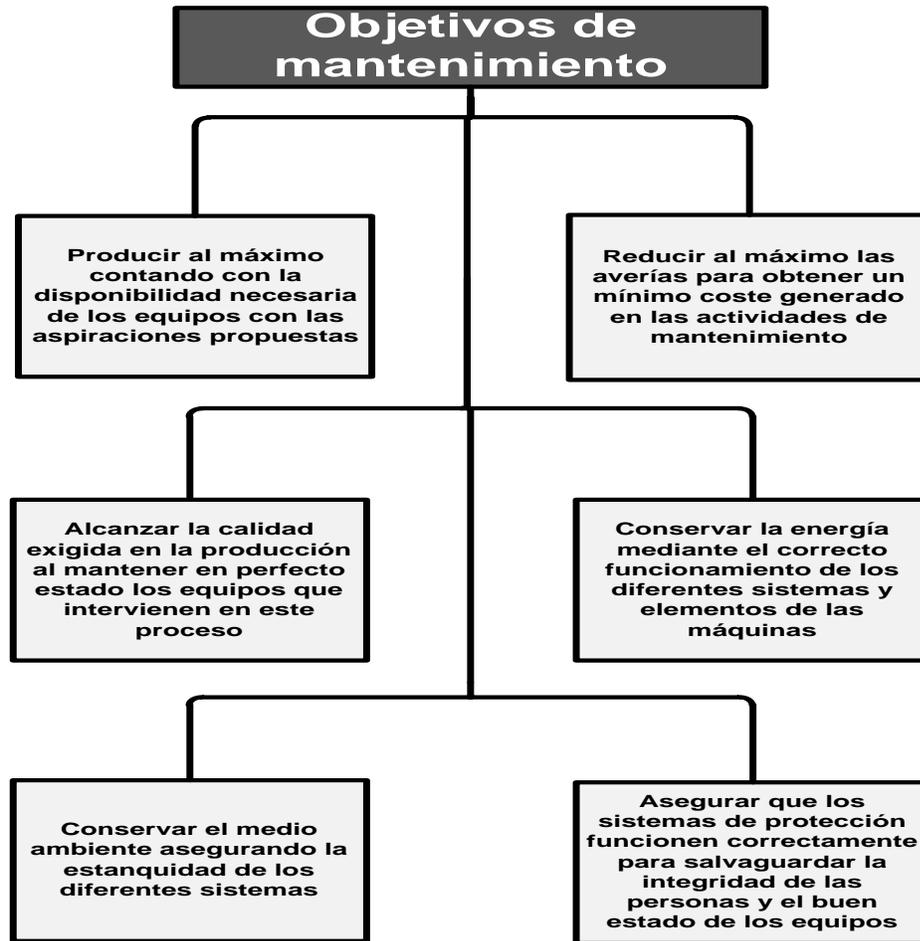
- Asegurar la disponibilidad y confiabilidad planeadas de la función deseada.
- Óptima producción del sistema.
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Disminuir el gasto de repuestos e inventarios.
- Maximizar la vida útil de los equipos.

Para alcanzar los objetivos del mantenimiento se debe tener lo siguiente:

- Contar con personal altamente calificado, así como supervisores.
- Adecuado programa de mantenimiento preventivo.
- Revisión de determinados componentes que requieren mantenimiento frecuentemente, identificar puntos críticos en el proceso productivo.
- Continua investigación de las causas que provocan fallas.
- Actualización de los procesos en función de los avances tecnológicos que se tengan al alcance.

Estrecha colaboración en todos los departamentos involucrados en el proceso de producción, operaciones y mantenimiento.

Figura 45. **Objetivos del mantenimiento**

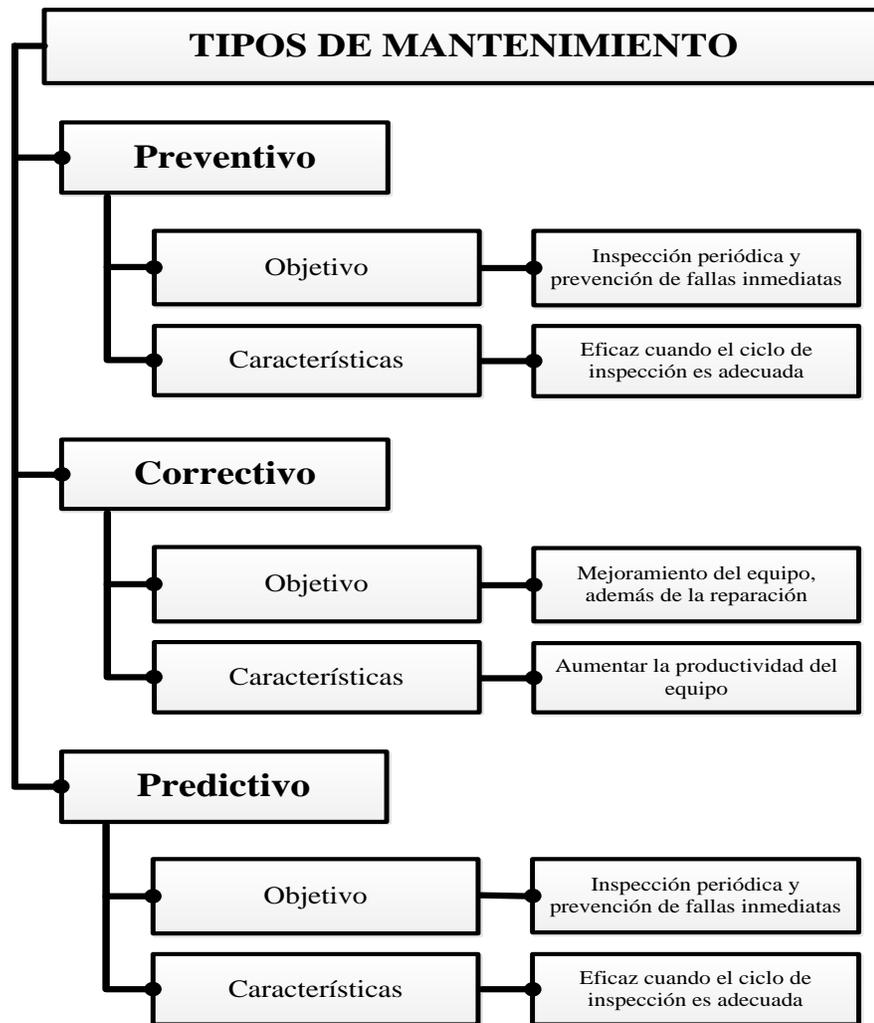


Fuente: elaboración propia.

2.6.2. Tipos de mantenimiento

Como se mencionó en apartados anteriores el mantenimiento se refiere al conjunto de acciones que prolongan el funcionamiento continuo de los equipos, reducen los costes en la producción, alargan la vida útil de los equipos y evitan pérdidas por paros de los equipos. El mantenimiento se clasifica en tres tipos, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 46. Tipos de mantenimiento



Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se muestran los tipos de mantenimiento: el preventivo, correctivo y predictivo, cada uno con sus objetivos y características correspondientes.

2.6.2.1. Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento se caracteriza por la conservación planeada. Su función es conocer sistemáticamente el estado de máquinas e instalaciones para programar en los momentos más oportunos y de menor impacto en la producción, las acciones que tratarán de eliminar las averías que originan las interrupciones. Su finalidad es reducir al mínimo las mismas y una depreciación excesiva de los equipos.

Este tipo de mantenimiento inspecciona los equipos y detecta las fallas en su fase inicial y las corrige en el momento oportuno. Las actividades de mantenimiento preventivo son las acciones ejecutadas para prevenir e identificar condiciones que interrumpan la producción, averías y deterioro acelerado del equipo. Se llevan a cabo en un paro programado basado en un análisis cíclico.

La insuficiencia o el exceso de mantenimiento preventivo aplicado a los equipos tendrá consecuencias negativas que afectaran tanto a disponibilidad de los mismos como a la confiabilidad en la operación, por lo anterior es de vital importancia determinar la frecuencia óptima de mantenimiento a los equipos y evitar caer en un submantenimiento o en un sobremantenimiento que, en ambos casos, reflejan altos costos y baja disponibilidad.

2.6.2.2. Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento se realiza para reparar o corregir una falla en el equipo. Generalmente, el mantenimiento correctivo puede ser no planificado y planificado, como se detalla a continuación.

El mantenimiento no planificado es el correctivo de emergencia deberá actuar lo más rápidamente posible para evitar costos y daños materiales o humanos mayores. Debe efectuarse con urgencia para reparar una avería imprevista o por una condición imperativa que hay que satisfacer como, problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, entre otros. Este sistema es aplicable en sistemas complejos, normalmente componentes electrónicos o en los que es imposible predecir las fallas y en los procesos que admiten ser interrumpidos en cualquier momento y durante cualquier tiempo, sin afectar la seguridad. También para equipos que ya cuentan con cierta antigüedad.

Tiene como inconvenientes, que la falla puede sobrevenir en cualquier momento, muchas veces, el menos oportuno, debido justamente a que en esos momentos se somete al bien a una mayor exigencia. Otro inconveniente de este sistema es que se debe disponer de un capital inmovilizado importante invertido en piezas de repuesto. Esto se debe a que la adquisición de muchos elementos que pueden fallar suele requerir una gestión de compra y entrega no compatible en tiempo con la necesidad de contar con el bien en operación (por ejemplo, en el caso de equipos discontinuados de fabricación, partes importadas, desaparición del fabricante). Por último, el personal que ejecuta el servicio debe ser altamente calificado y sobredimensionado en cantidad, pues las fallas deben ser corregidas de inmediato. Generalmente, se agrupa al personal en forma de cuadrillas.

En el caso del mantenimiento planificado correctivo se sabe con anticipación qué es lo que debe hacerse de modo que, cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente. Al igual que el anterior, corrige la falla y actúa ante un hecho cierto. La diferencia con el de

emergencia, es que no existe el grado de apremio del anterior, sino que los trabajos pueden programarse para realizarse en el futuro próximo, sin interferir con las tareas de producción.

En general, se programa la detención del equipo, pero antes de hacerlo, se acumulan tareas sobre el mismo y se programa su ejecución en dicha oportunidad, aprovechando para ejecutar toda tarea que no se podría hacer con el equipo en funcionamiento. Lógicamente, se aprovechará para las paradas, horas en contra turno, períodos de baja demanda, fines de semana, períodos de vacaciones, entre otros.

2.6.2.3. Mantenimiento predictivo

Este mantenimiento se caracteriza porque determina, en todo instante, la condición técnica, mecánica y eléctrica, real de la máquina examinada, mientras esta se encuentre en pleno funcionamiento. Este mantenimiento se realiza mediante un programa sistemático de mediciones de los parámetros más importantes del equipo.

El sustento tecnológico de este mantenimiento consiste en la aplicación de algoritmos matemáticos agregados a las operaciones de diagnóstico, que juntos pueden brindar información referente a las condiciones del equipo. Su objetivo es disminuir las paradas por mantenimientos preventivos y, de esta manera, minimizar los costos por mantenimiento y por ausencia de producción.

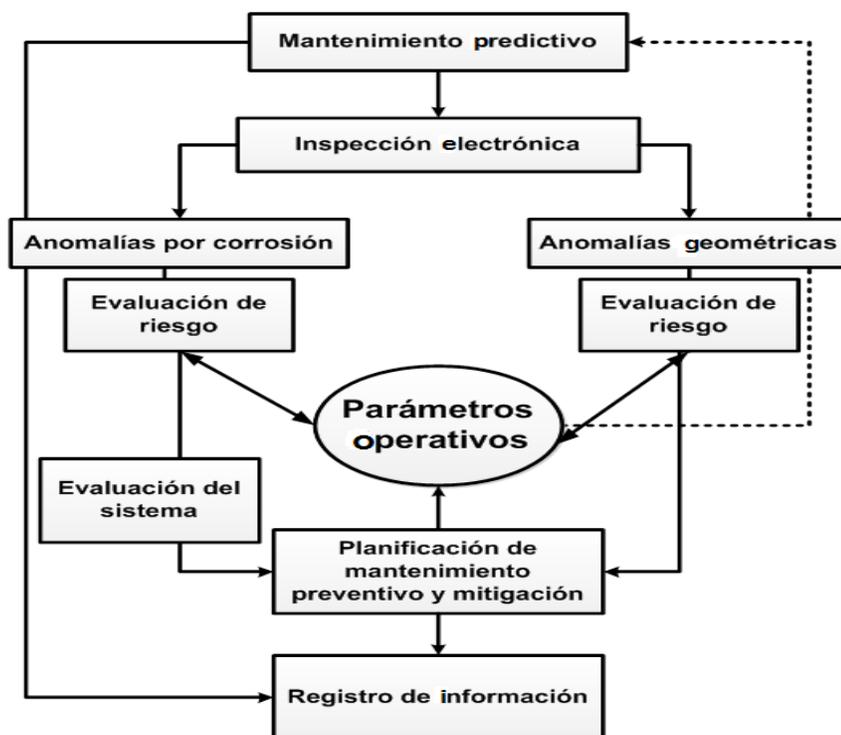
Este mantenimiento se aplica para predecir una falla de los equipos, generalmente, utilizando algún tipo de instrumento de medición o análisis de laboratorio para poder determinar el estado del equipo aun cuando este no

presenta ninguna falla a simple vista. Esto tiene la particularidad que puede tener un costo muy elevado ya que los análisis pueden ser muy costosos.

Se debe determinar la factibilidad de aplicar las técnicas disponibles del mantenimiento predictivo al equipo, como el análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite y alineación con rayos láser, para que sea este el que determine su mantenimiento y no con base en una fecha determinada.

El mantenimiento predictivo es, entonces, una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle.

Figura 47. **Organización del mantenimiento predictivo**

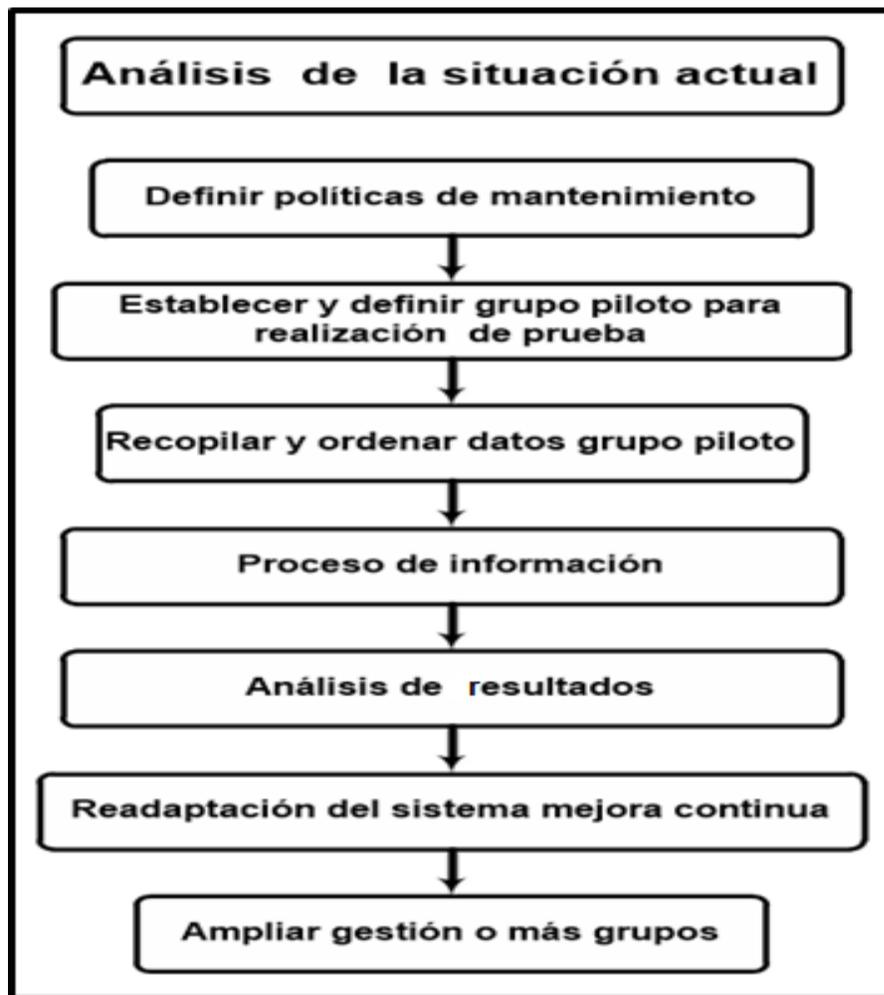


Fuente: elaboración propia.

2.6.3. Proceso de mantenimiento

Es un sistema de tareas programadas, organizado y estructurado sobre la base de unidades técnicas, especificando las fechas y tipos de trabajos que se deben realizar a una serie de edificaciones, instalaciones, maquinarias y equipos de una hidroeléctrica.

Figura 48. Proceso de mantenimiento



Fuente: elaboración propia.

Las etapas del proceso de mantenimiento pueden ser las siguientes:

- Determinación de los equipos, maquinarias e instalaciones críticas, sobre la base de los análisis de los parámetros establecidos, los cuales generalmente están relacionados directamente con los procesos productivos.
- Determinación y tabulación de las recomendaciones, recurrencias y necesidades de mantenimiento establecidas por el fabricante y de las mejores prácticas en el mercado de servicios de mantenimiento.
- Planificación de las tareas de mantenimiento a realizar en función de unidades de tiempo y recurrencias establecidas, las cuales deben ser previamente analizadas y tabuladas.
- Determinación de los recursos necesarios y asignación de responsabilidades y tareas al personal que participará directa e indirectamente en las labores de mantenimiento.
- Definición de los controles a cumplir y el monitoreo recurrente que se debe realizar al cumplimiento del programa.

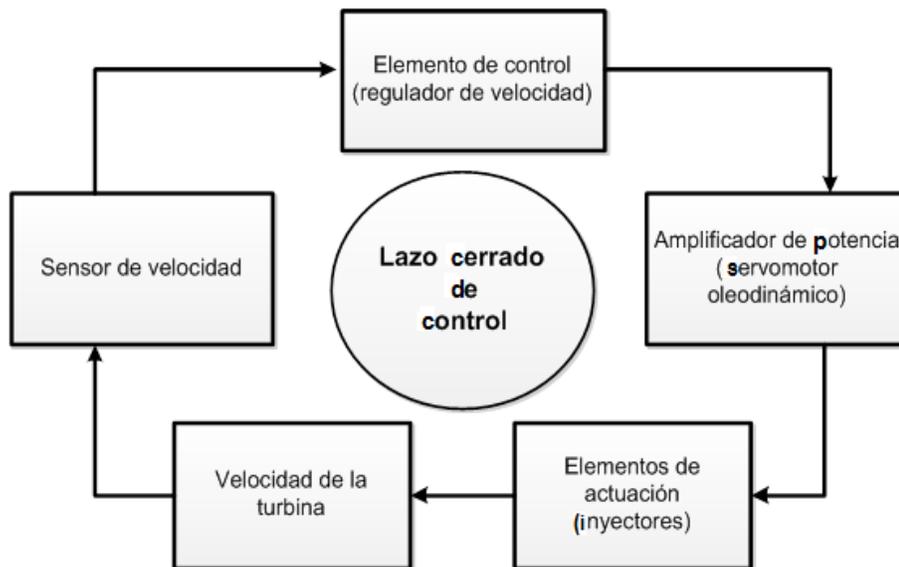
3. DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN OLEODINÁMICO DE TURBINA PELTON

3.1. Funcionamiento del equipo para medición de velocidad

La medida de la velocidad se obtiene por medio de sensores de velocidad de efecto hall, los cuales con su comportamiento dinámico garantizan una generación de impulsos de hasta 0,05 Hz, seguido de un amplificador que tiene una característica de disparo y una etapa de salida a prueba de cortocircuito. Generan señales de frecuencia proporcional a la velocidad por medio de impulsos mediante una rueda dentada ferromagnética adosada al eje del generador.

Esta señal de velocidad es enviada al regulador electrónico de velocidad donde se compara la velocidad de consigna y, si existe una desviación, el regulador electrónico da las correspondientes órdenes de mando a las válvulas proporcionales de los inyectores para corregir dicha desviación. La regulación de la velocidad también se puede ajustar por medio del deflector el cual va incorporado a cada inyector, el cual se describirá más adelante.

Figura 49. **Lazo cerrado de control de velocidad de la turbina**



Fuente: elaboración propia.

3.1.1. **Unidad de potencia oleodinámica**

El equipo oleodinámico está conformado por los siguientes elementos principales, unidad de potencia oleodinámica:

- Motores eléctricos: trifásicos. Principal y de reserva.
- Bombas hidráulicas: de engranajes. Principal y de reserva.
- Acumulador neumático: tipo pistón. En serie con la línea de presión.
- Enfriador de aceite: tipo tubular agua-aceite. En la línea de retorno.
- Calentador de aceite: eléctrico de inmersión. Dentro del depósito de aceite.
- Filtros: en la succión de la bomba, en la línea de presión y en la línea de retorno.

- Líneas de conducción del fluido: tubería metálica de espesor definido para soportar las altas presiones y mangueras hidráulicas de alta resistencia.

3.2. Funcionamiento de la unidad de potencia oleodinámica

En la figura 50, las bombas de flujo constante 1, succionan el aceite desde el depósito 16. Antes pasa por los filtros de succión 15, y se envía hasta la línea de presión. La válvula de seguridad 2 controla la presión en esta línea. Luego, pasa por la válvula selectora de filtros de presión 5 para escoger el filtro en operación 6. En la línea de presión se encuentra la electroválvula 2/2 vías 3, que mantiene la presión dentro del rango de operación del sistema oleodinámico junto con el presostato 4. A continuación, el aceite pasa hacia la válvula selectora 3 de filtros de retorno 11, y por último, hacia el enfriador de aceite 13, si la temperatura del aceite estuviera muy alta. Si la temperatura del aceite baja dentro de cierto valor, el calentador 14 es puesto en operación.

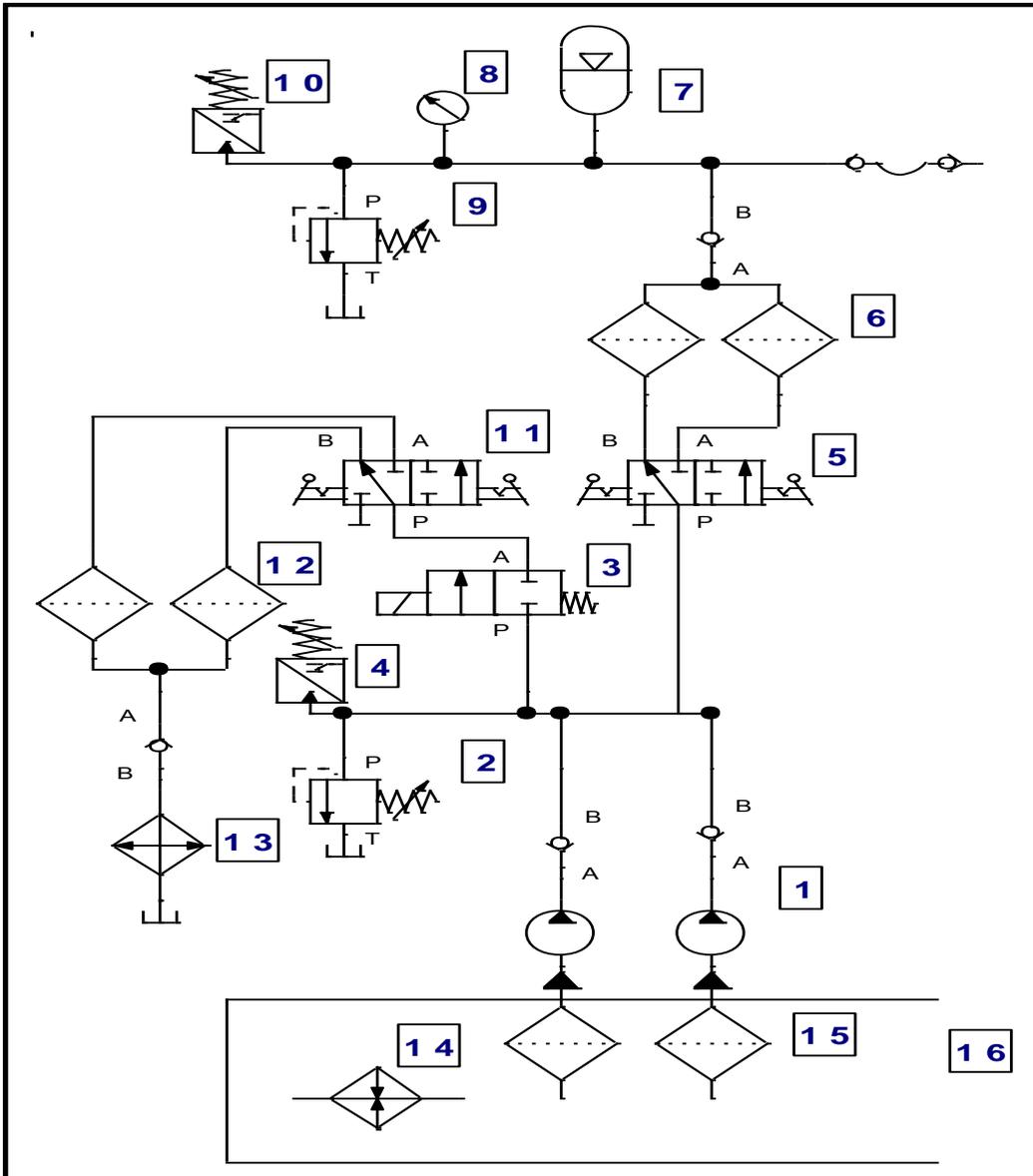
El aceite filtrado circula hacia la línea principal, donde la presión es compensada por el acumulador 7 y controlada por la válvula de seguridad 9. El cambio de bomba por baja presión de aceite lo efectúa el presostato 10. El manómetro 8, permite la lectura de la presión de la línea principal que abastece a los circuitos del sistema de regulación oleodinámico de la turbina.

Señales de monitoreo y control de la unidad de potencia oleodinámica:

- Nivel del aceite del depósito
- Temperatura del aceite del depósito
- Presión diferencial de filtros de presión y de retorno
- Presión de aceite de la línea de presión
- Presión de aceite de la línea principal

- Presión de gas del acumulador
- Nivel de aceite del acumulador

Figura 50. Circuito oleodinámico de la unidad de presión



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

Como la viscosidad del fluido hidráulico afecta de manera significativa los efectos del amortiguamiento y la fricción de los circuitos oleodinámicos, se realizan pruebas de estabilidad térmica a la temperatura de operación más alta posible. Un requerimiento del aceite es la capacidad de resistir la degradación y el ataque de metales a altas temperaturas. Esta prueba antidesgaste es un requisito indispensable para el aceite usado en el equipo oleodinámico. Para el control de la temperatura se cuenta con enfriador y calentador de aceite para mantener la viscosidad dentro del rango de estabilidad operacional.

3.2.1. Válvulas

- Proporcionales: para los inyectores y deflector.
- Distribuidora: 4/2 vías de retorno por resorte y accionada por embolo, para la aplicación de sellos. 4/2 vías de retorno por resorte y accionada por solenoide, para el mando de la válvula esférica y de derivación.
- Reguladoras de caudal: para el control de velocidad de los inyectores, deflector, frenos, válvula de mariposa, inyector de frenado y válvula de derivación.
- Antirretorno: para las bombas de impulsión, filtros de presión, línea de presión, inyectores, bloque de deflector, bloque de frenos y válvula de mariposa, bloque de sellos de servicio, inyector de frenado y válvula de derivación.
- De seguridad: a la salida de las bombas, en la línea de presión y la línea de frenado.
- De vaciado: del circuito de presión.
- Selectora de filtros: de presión y de retorno.
- Termostática: para el control del flujo de agua de enfriamiento.
- Hidráulica tipo aguja: para el equilibrado de presiones y para alimentar el inyector de frenado.

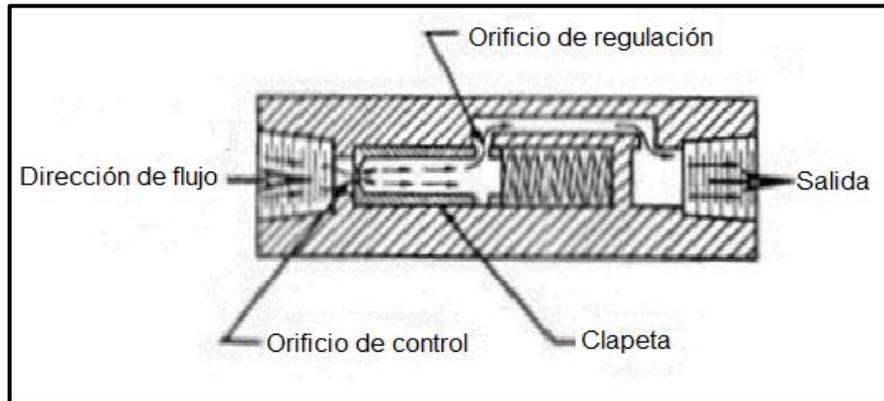
3.2.1.1. Compensación por presión para las válvulas reguladoras de caudal

La compensación hidrostática consiste en mantener constante la caída de presión a través del orificio de control, de esta forma el flujo a través del orificio será constante. Estas válvulas para este propósito crean una caída de presión de aproximadamente 75 psi en la línea, las cuales son utilizadas para mover el mecanismo de compensación, que en este caso es un muelle.

El orificio de control tiene un tamaño tal que, cuando la válvula transporta un flujo determinado, la caída de presión a través de este orificio es de aproximadamente 75 psi, que balancean la tensión del muelle sobre la clapeta.

Tan pronto como el flujo que pasa a través del orificio de control tiende a elevar su caída de presión, se incrementa proporcionalmente provocando el desplazamiento de la clapeta lentamente hacia la derecha. Este cierre estrangula el orificio provocando una restricción en el flujo, que acarrea su descenso al valor determinado. Si desciende el valor determinado del flujo a través del orificio de control, la caída de presión desciende, por lo tanto, el muelle de oposición, abre la estrangulación procurando incrementar el flujo.

Figura 51. **Compensación de presión por muelle**



Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

Otra forma de compensación de presión se hace por medio de dos estranguladores en serie. El primero corresponde a una luz regulable mediante el ajuste hexagonal; el segundo, pilotado por la presión previa y sucesiva al primer estrangulador, garantiza un salto de presión constante entre fase previa y fase sucesiva al estrangulamiento regulable. En estas condiciones, el valor de caudal predispuesto se mantiene constante dentro de un campo de tolerancia del ± 2 % del caudal a plena escala para la variación máxima de presión entre las cámaras de entrada y de salida de la válvula.

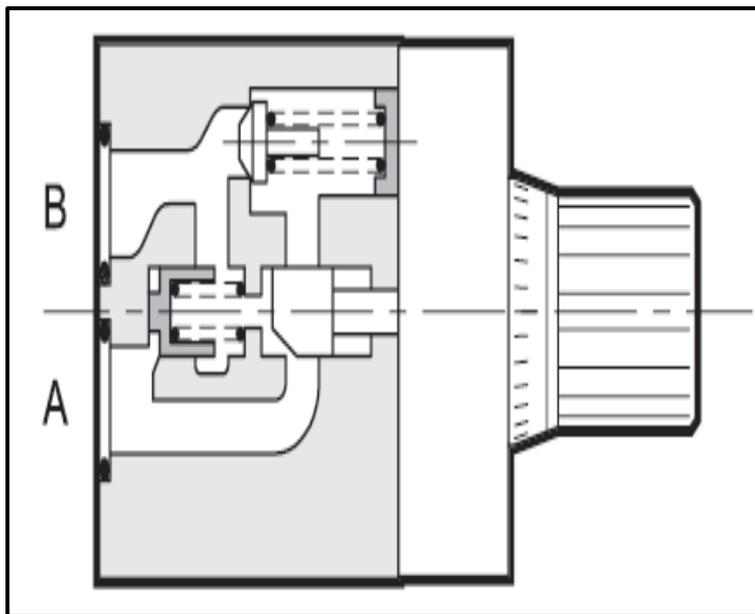
3.2.1.2. Compensación por temperatura para las válvulas reguladoras de caudal

La compensación de temperatura de válvulas se obtiene según el principio del paso del fluido en diafragma, en el que, las variaciones de viscosidad del aceite no influyen en el caudal sustancialmente, para caudales controlados inferiores a 0,5 l/min y con una amplitud de oscilación térmica de 50 °C.

Se obtiene un incremento de caudal de aproximado del 13 % del valor de caudal predispuesto. Para caudales superiores, con la misma amplitud de oscilación térmica, el incremento de caudal es de aprox. el 4 % del valor a plena escala.

Una segunda forma de compensación por temperatura, se obtiene por medio de la dilatación de un dispositivo metálico, que regula el paso del aceite al variar su temperatura. La tercera forma de compensación por temperatura, aunque en menor medida, se realiza por medio de estrangulación tipo hélice, su corto estrechamiento significa que la acción de esta válvula es virtualmente independiente de la viscosidad. La hélice proporciona un ajuste preciso, ya que el ajuste de todo abierto a todo cerrado, requiere un giro de 360°. Sin embargo, la hélice es bastante costosa de fabricar.

Figura 52. **Compensación de temperatura**



Fuente: *Duplomatic Oleodinámica*. www.hidraulik.com.ar. Consulta: enero de 2017.

3.2.2. Cilindros oleodinámicos

También se denominan servomotores oleodinámicos. Constituyen los elementos actuadores. Estos transforman la presión hidrodinámica del aceite en movimiento, el cual genera un trabajo y a la vez una potencia hidráulica cuando se relaciona con el tiempo.

- Cilindros de simple efecto de retorno por muelle: para el deflector, frenos, válvula esférica e inyector de frenado.
- Cilindros de doble efecto de retorno por muelle: para los inyectores.

Figura 53. **Cilindro oleodinámico del deflector**



Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Instrumentación

La instrumentación de los equipos es diseñada para operar los equipos de manera centralizada y de forma automática, por lo que se da prioridad a los elementos de medición electrónicos y se dejan al mínimo los instrumentos de visualización local para monitoreo de operaciones no críticas.

- Presostatos electrónicos: para indicación de filtros saturados, arranque de bombas oleodinámicas y protecciones por alta y baja presión.
- Nivostatos electrónicos: para alarma por alto nivel de aceite, bajo-alto-muy alto de aceite de acumulador.
- Nivostato-termostato: para control de nivel y temperatura de aceite de depósito y conectar calefacción/alarma por baja temperatura.
- Termostato: para disparo por muy alta temperatura de aceite.
- Manómetro: en la línea de presión.
- Termómetro: para la temperatura del aceite.
- Indicador de nivel: para indicación del nivel del aceite del depósito
- Indicar el desplazamiento del vástago de los cilindros hidráulicos.
- Detectores de posición: tipo inductivo, para determinar la posición del vástago de los cilindros oleodinámicos

3.3. Funcionamiento de los inyectores y deflector

Para un óptimo funcionamiento de los inyectores y deflectores son necesarias las partes que se describirán a continuación y sus respectivos mantenimientos para su correcto funcionamiento.

3.3.1. Servoválvulas proporcionales

De tipo carrete 4/3 vías con centro cerrado de mando directo muestran alta dinámica en combinación con el flujo máximo para una mayor precisión en el posicionamiento del eje hidráulico y el control de la presión y la velocidad. Tienen un paso de respuesta menor a 3,5 ms y una sensibilidad menor al 0,03 %. Ante una pérdida de voltaje de mando del carrete retorna a posición de cierre definido por el muelle, este es el cierre centrado.

El control es efectuado por el regulador electrónico de velocidad. Las servoválvulas son alimentadas por 24 V de corriente continua y con señal electrónica de control de 4-20 mA.

El transformador diferencial de variable lineal, TDVL, produce un voltaje proporcional a la posición del carrete, este voltaje se realimenta al circuito electrónico y se compara con el voltaje de control.

Si el voltaje no es igual, el circuito electrónico hará que la corriente fluya a través de la bobina del motor para corregir la posición del carrete hasta que esta corresponda a la posición deseada. De esta manera, el TDVL proporciona un control interno de lazo cerrado de la posición del carrete.

La operación detallada de la válvula es la siguiente:

- El circuito electrónico convierte el voltaje de control en una corriente utilizada para accionar el motor de fuerza lineal.
- El motor de fuerza lineal mueve el carrete según la polaridad y el nivel del voltaje de control.

La polaridad del voltaje de control, la cual es positiva (+) o negativa (-), determina cuando el carrete se mueve en la posición de flechas derechas o la posición de flechas cruzadas. El nivel del voltaje de control determina la distancia por donde se mueve el carrete:

Cuando se aplica un voltaje de control positivo a la válvula, el circuito electrónico hace que fluya una corriente proporcional a través de la bobina del motor. Esto crea un campo magnético alrededor de la bobina, causando que la armadura del motor mueva el carrete a la izquierda. Esto comprime el resorte

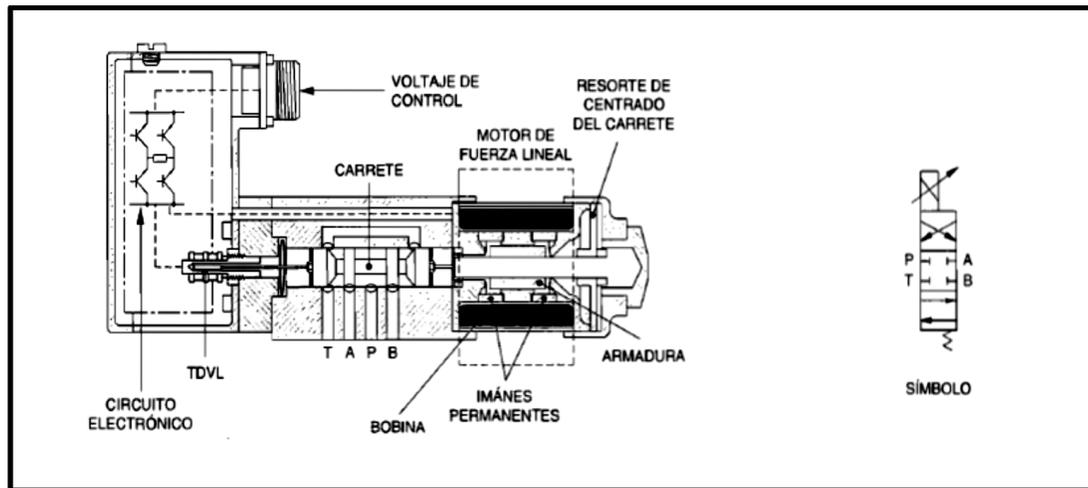
de centrado del carrete y conecta el puerto P al puerto A y el puerto T al puerto B, lo cual es la condición de flechas derechas.

La distancia que recorre el carrete cuando ha sido movido a la izquierda es directamente proporcional a la corriente y por tanto al voltaje de control. Cuanto mayor sea el voltaje de control, el carrete se moverá lo más lejos hacia la izquierda, a la posición completamente abierta.

Cuando se aplica un voltaje de control negativo a la válvula, el circuito electrónico hace que la corriente, a través de la bobina del motor, cambie de dirección. Esto invierte la dirección del campo magnético alrededor de la bobina, causando que la armadura mueva el carrete a la derecha y comprime el resorte de centrado del carrete. También conecta el puerto P al puerto B y el puerto T al puerto A, lo cual es la condición de flechas cruzadas. Cuanto mayor sea el voltaje de control, el carrete se moverá lo más lejos hacia la derecha, a la posición completamente abierta.

Si se quita el voltaje de control o se coloca en 0 V, el resorte de centrado volverá automáticamente el carrete a la posición central bloqueando todos los puertos de la válvula, cuando es de centro cerrado. Existiendo también otras configuraciones, como de centro abierto, entre otros

Figura 54. **Válvula proporcional utilizando un motor de fuerza lineal para accionar su carrete**



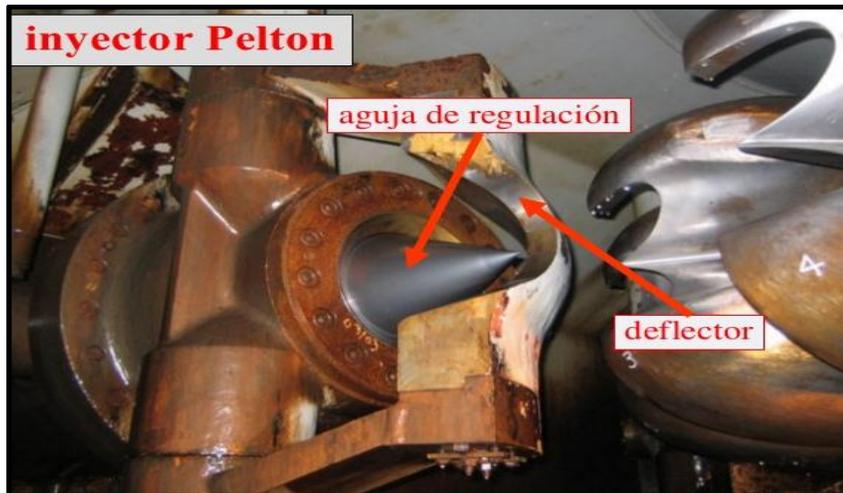
Fuente: *Válvulas proporcionales*. www.hnsa.com.co. Consulta: enero de 2017.

Cuando los índices de presión y caudal aumentan, la fuerza necesaria para mover el carrete aumenta. Como resultado, las válvulas proporcionales operadas directamente tienen un límite de factibilidad el cual está alrededor de 75 l/min [20 gal(US)/min]. Para caudales mayores, se deben utilizar las válvulas proporcionales operadas por piloto.

3.3.2. Actuadores de los inyectores

Para los inyectores se cuenta con servomotores oleodinámicos de doble efecto con retorno por muelle. La punta de la aguja de regulación y el asiento son de acero inoxidable. Cada inyector está equipado con un deflector de acero inoxidable accionado mecánicamente por un sistema de palancas las cuales se controlan por medio de un cilindro oleodinámico de simple efecto de retorno por muelle.

Figura 55. Inyector Pelton



Fuente: AGÜERA, José. *Turbinas hidráulicas*. www.es.slideshare.net. Consulta: diciembre de 2016.

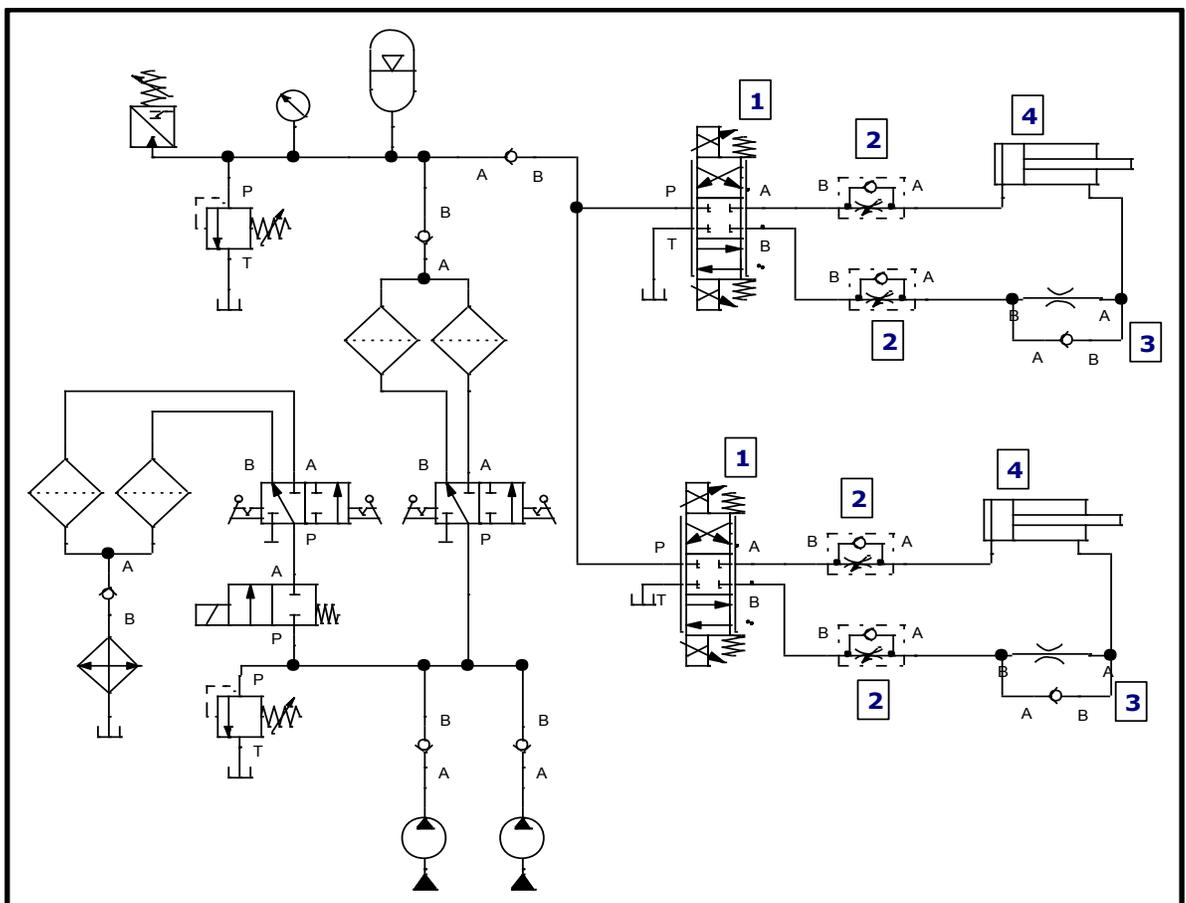
3.4. Funcionamiento de los inyectores

En la figura 56, el regulador electrónico de velocidad es el elemento de control que regula las servoválvulas proporcionales 1, las cuales comandan el elemento amplificador de potencia. Este es el servomotor oleodinámico de doble efecto 4, que moviliza la aguja del inyector, direccionando así, el flujo de agua hacia la los alabes de la turbina.

La velocidad de apertura y cierre de los inyectores y del deflector se efectúa también por medio de válvulas reguladoras de caudal con antirretorno 2, una aguja cilíndrica con una muesca en V permite el ajuste fino sobre toda la gama de ajustes, regulando la apertura y cierre en tres rotaciones de la aguja cilíndrica. En el cierre se encuentra un diafragma con antirretorno 3, para limitar la velocidad de cierre del inyector.

Estas regulaciones de caudal permiten integrar una pendiente suave de actuación sobre la velocidad de la turbina, la cual es necesaria para mantener cambios suaves de velocidad y a la vez de la potencia del generador, esto lo proporciona el control PID del regulador electrónico de velocidad. Los transmisores de posición permiten el monitoreo del desplazamiento del vástago del inyector en su carrera de ida y retorno, como una doble medida de seguridad, es monitoreada la posición por medio de las electroválvulas proporcionales por medio del transformador diferencial de variable lineal.

Figura 56. **Circuito oleodinámico con dos inyectores**



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

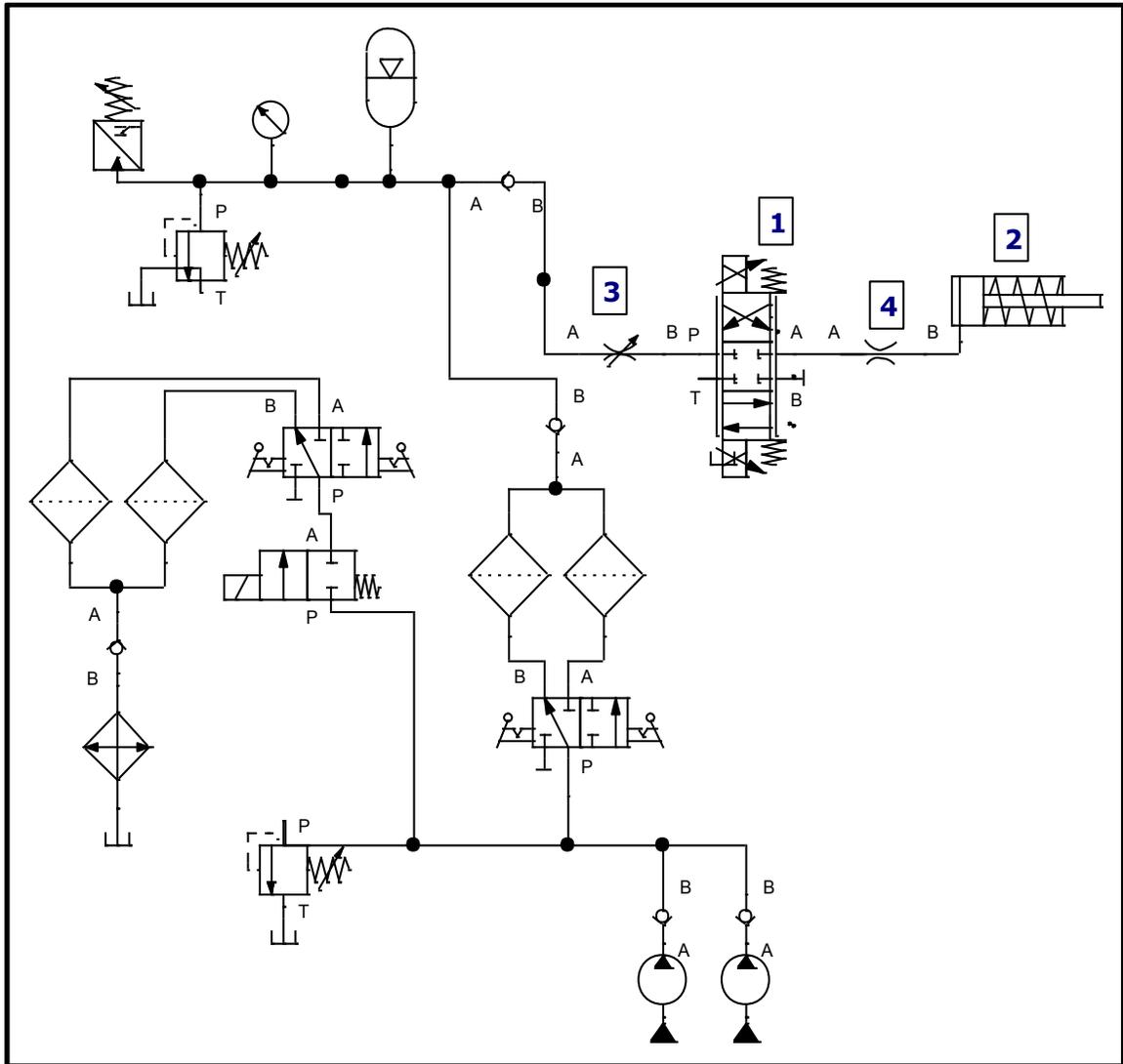
Señales de monitoreo y control de los inyectores:

- Velocidad de la turbina.
- Desplazamiento del vástago de cada inyector en su carrera de apertura y cierre.
- Señal de mando del regulador electrónico de velocidad hacia las servoválvulas.

3.5. Funcionamiento del deflector

En la figura 57, el mando del deflector es por el PLC maestro y el regulador electrónico de velocidad los cuales, a través de una electroválvula proporcional 4/2 vías con retorno por muelle 1, controlan el cilindro de simple efecto 2, el cual puede cortar gradualmente el flujo de agua hacia los alabes de la turbina, disminuyendo así, la velocidad del generador. Esto se debe a que el cierre de los inyectores es gradual, con una pendiente de actuación lenta para evitar el golpe de ariete en la tubería de presión.

Figura 57. Circuito oleodinámico del deflector



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

La velocidad de apertura del deflector se puede regular por medio de una válvula reguladora de caudal 3 y una tobera 4. El deflector va instalado junto a cada inyector y controlado por un conjunto de palancas cuyo actuador es un cilindro oleodinámico de simple efecto de retorno por muelle, común para todos los deflectores.

El sensor de posición permite el monitoreo del desplazamiento del vástago del cilindro oleodinámico del deflector en su carrera de ida y retorno.

Señales de monitoreo y control del deflector:

- Velocidad de la turbina.
- Posición del vástago del servomotor oleodinámico.
- Señal de mando del regulador electrónico de velocidad hacia la servoválvula.

3.6. Funcionamiento del cierre de parada por protecciones

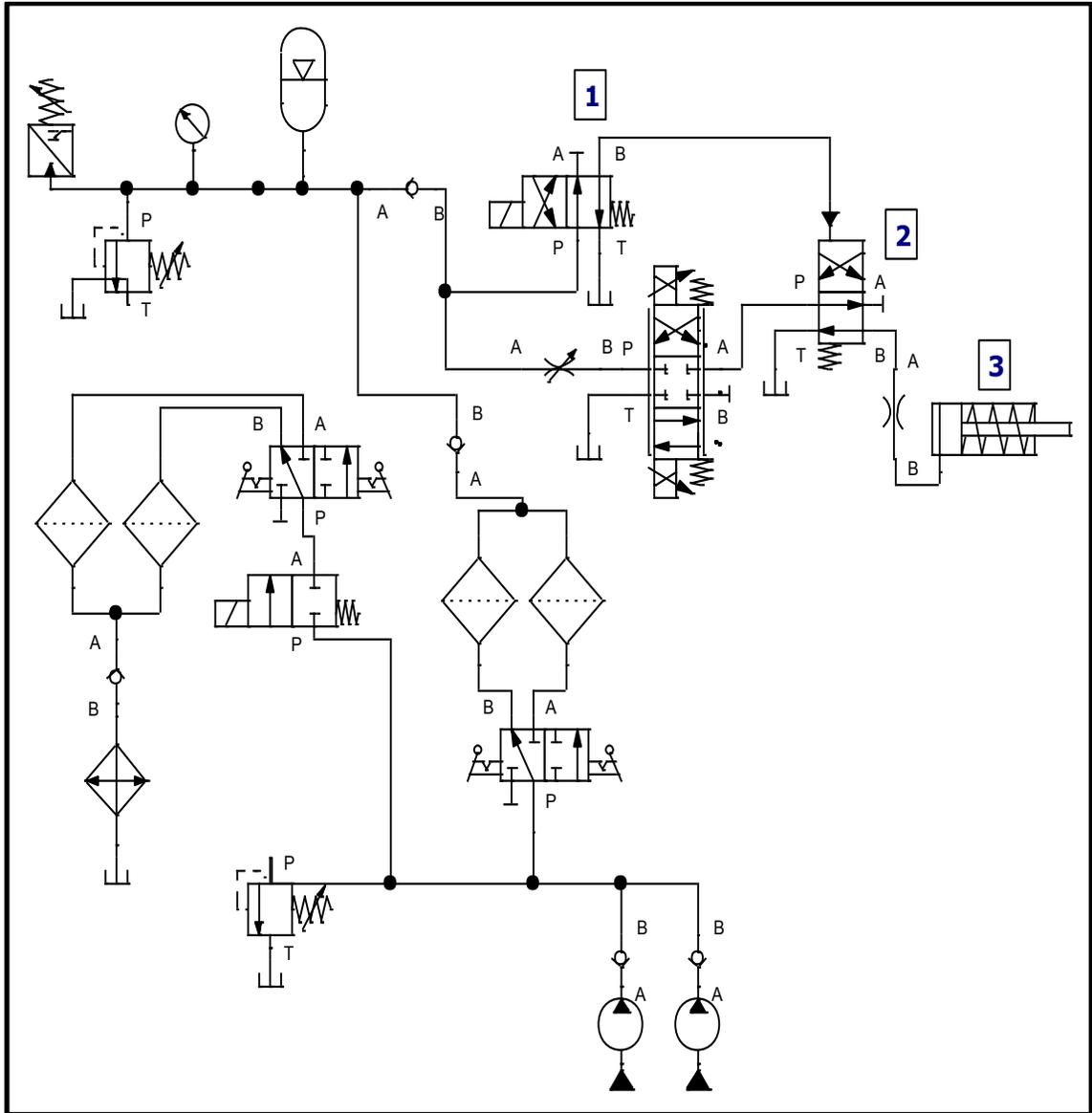
En la figura 58, el cierre rápido es controlado por el PLC maestro, quien por medio de una electroválvula distribuidora 4/2 vías 1, la cual pilota otra electroválvula 4/2 vías 2 que impide el flujo de aceite hacia el cilindro de simple efecto 3. De esta manera, corta el flujo de agua hacia la turbina y evitan la velocidad de embalamiento cuando existe un disparo intempestivo del generador. Se acciona cuando se presenta un disparo de emergencia debido a fallas mecánicas o eléctricas, los relés maestros 86M, 86E, 86BF y 86T realizan la señal y reciben el mando por el PLC maestro, relés de protección, AVR, RV o por pulsadores de disparo manual.

El deflector retorna por medio del muelle incorporado en el cilindro oleodinámico.

Señales de monitoreo y control del cierre rápido del deflector:

- Señal de mando de los relés maestros de protección eléctrica y mecánica.
- Posición del vástago del servomotor oleodinámico.

Figura 58. Circuito oleodinámico de parada por protecciones

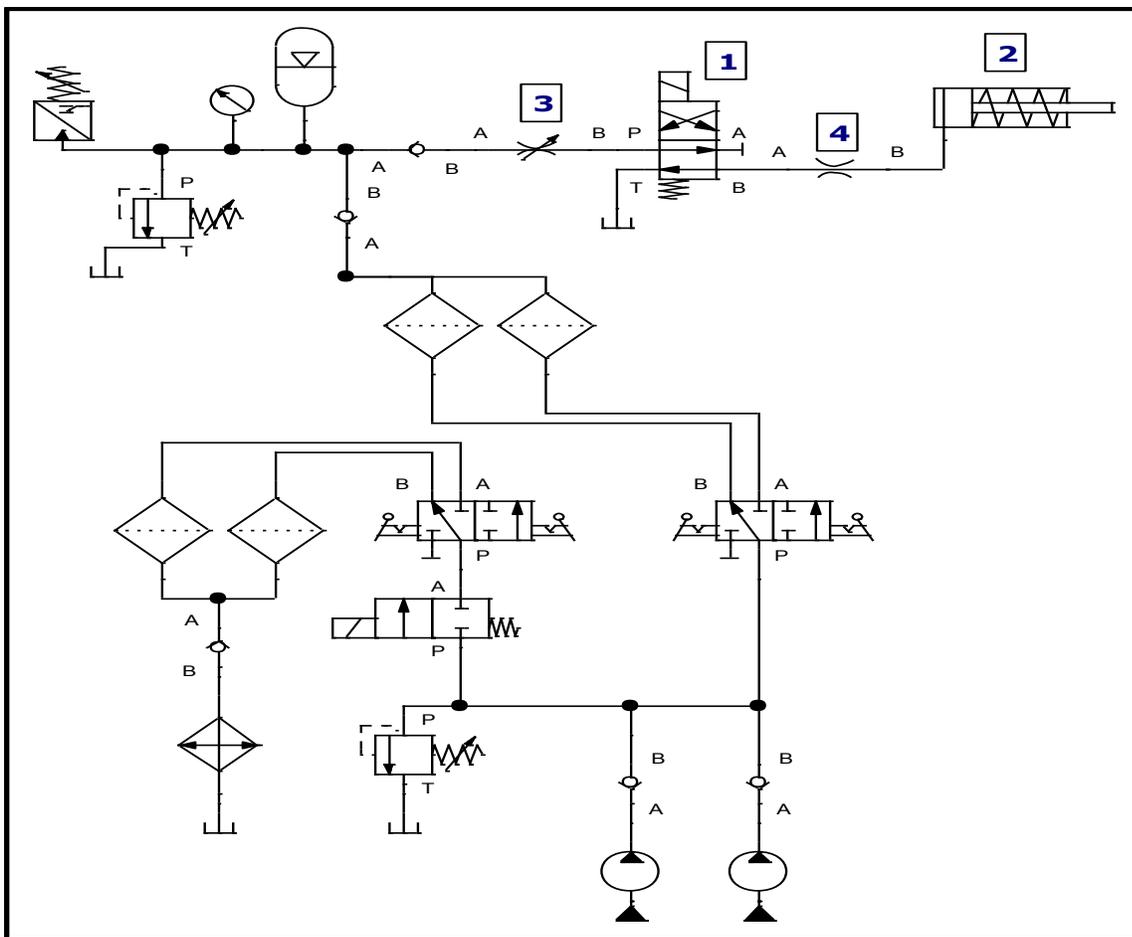


Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

3.7. Funcionamiento del inyector de frenado

En la figura 59, el inyector de frenado 2 es accionado por una electroválvula distribuidora 4/2 vías de retorno por muelle 1, la cual es comandada por el PLC maestro para frenar la turbina en una secuencia de parada cuando las revoluciones de esta se encuentran al 50 % de la velocidad nominal, por medio de un contrachorro de agua que actúa sobre la parte opuesta de los alabes de la turbina.

Figura 59. Circuito oleodinámico del inyector de frenado



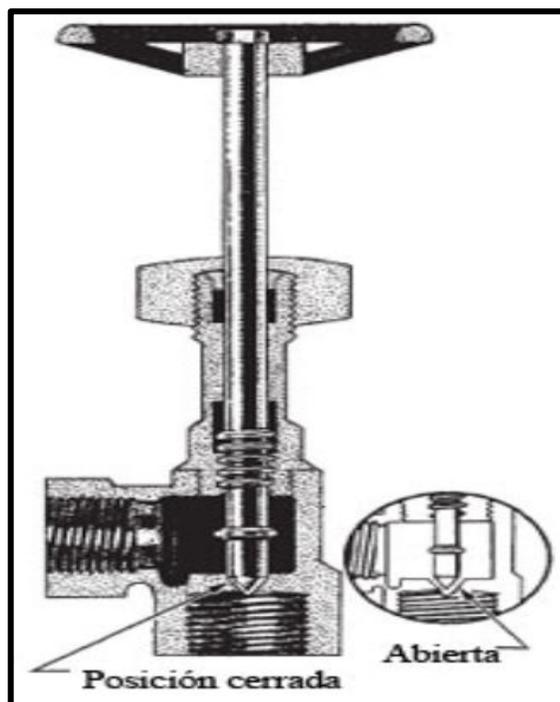
Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

El retorno de la válvula de aguja 2 es por muelle. La velocidad de apertura del inyector de frenado se puede regular por medio de una válvula reguladora de caudal 3 y una tobera 4. El sensor de posición permite el monitoreo del desplazamiento del vástago del inyector de frenado en su carrera de ida y retorno.

Señales de monitoreo y control del inyector de frenado:

- Velocidad de la turbina.
- Posición del vástago del servomotor oleodinámico.
- Señal de mando del PLC maestro hacia la electroválvula.

Figura 60. **Válvula oleodinámica tipo aguja del inyector de frenado**

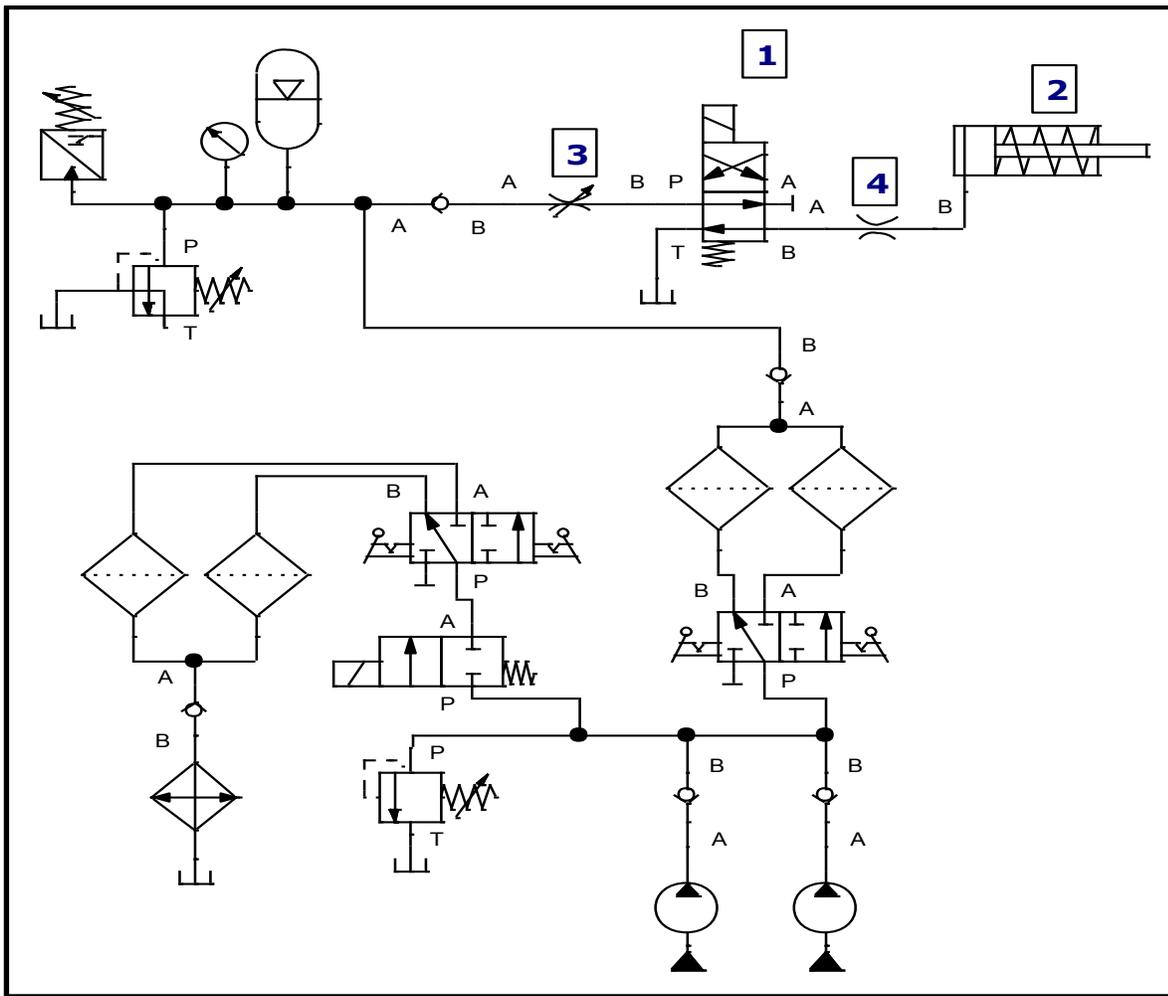


Fuente: *Conceptos básicos de neumática e hidráulica*. www.sapiensman.com. Consulta: enero de 2017.

3.8. Funcionamiento de la válvula de derivación

En la figura 61, el control de la válvula de derivación 2, se realiza por medio de una electroválvula distribuidora 4/2 vías de retorno por muelle 1, comandada por el PLC maestro. La velocidad de apertura de la válvula se puede regular por medio de una válvula reguladora de caudal 3 y una tobera 4.

Figura 61. Circuito oleodinámico de válvula de derivación



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

El sensor de posición permite el monitoreo del desplazamiento del vástago de la válvula en su carrera de ida y retorno.

Señales de monitoreo y control de la válvula de derivación:

- Posición de la válvula de guarda
- Posición del vástago del servomotor oleodinámico
- Señal de mando del PLC maestro hacia la electroválvula

La válvula de derivación se encarga de igualar las presiones antes de la válvula esférica y después de ella, para evitar esfuerzos excesivos al abrirla, de esta manera, se cuida la integridad de la propia válvula, de los cilindros oleodinámicos, de la tubería y de la unidad hidráulica de presión.

Figura 62. **Válvula de derivación tipo aguja sobre válvula de guarda**



Fuente: elaboración propia.

3.9. Funcionamiento de la válvula de guarda

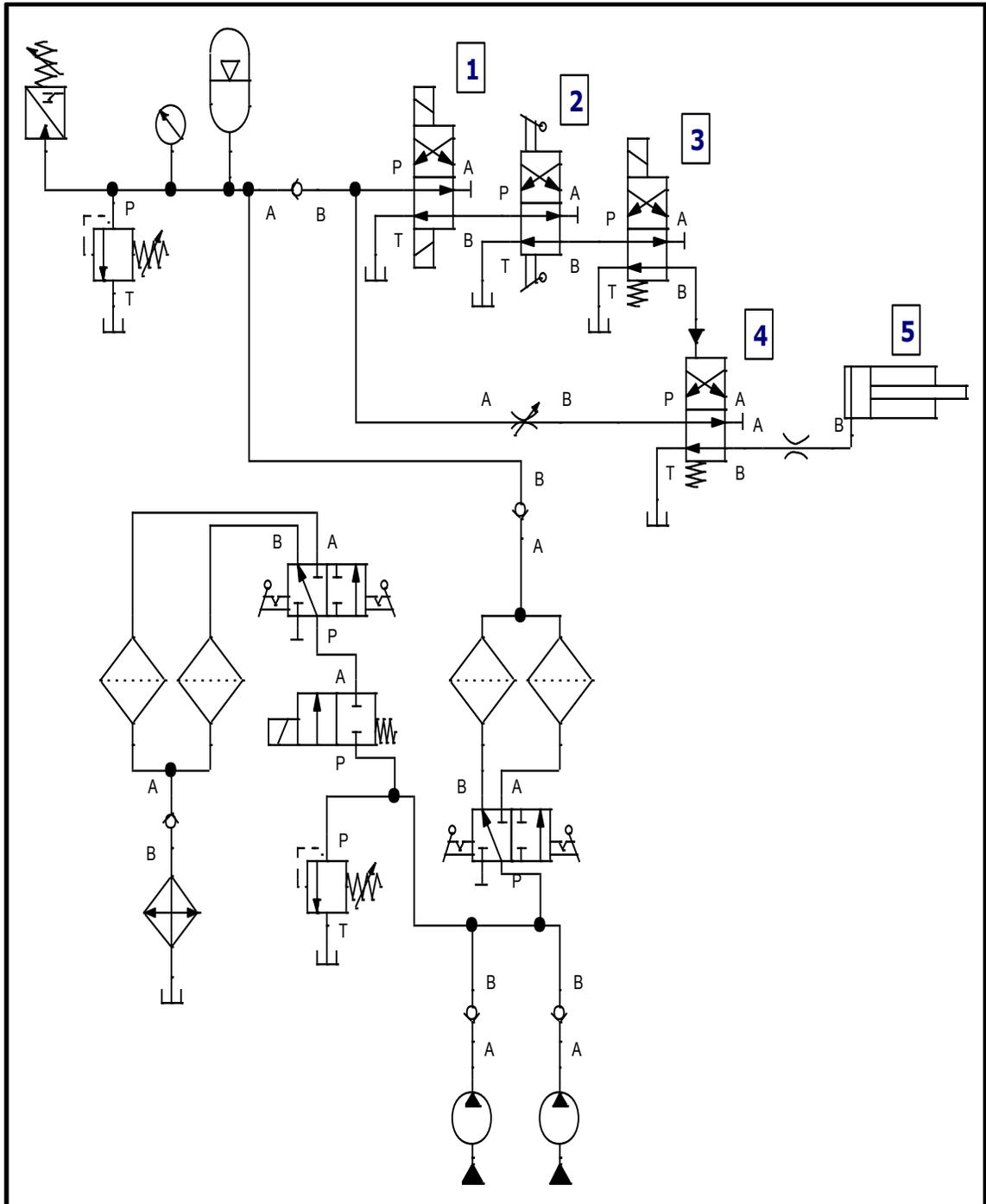
En la figura 63, los detectores de posición muestran la apertura o cierre de la válvula de derivación y junto a la presión de ecualización establecida y a la desaplicación de sellos de operación 1 y mantenimiento 2, el PLC maestro permite la apertura de la válvula de guarda, a través de la electroválvula 4/2 vías 3, la cual pilota otra válvula 4/2 vías 4 para dejar pasar aceite al cilindro oleodinámico de simple efecto 5. La señal de retroalimentación es la posición del cilindro hidráulico identificada por medio de los detectores de posición.

Para el cierre de la válvula de guarda, la electroválvula 4/2 vías 3 quita el pilotaje a la válvula 4/2 vías 4 y, con la fuerza de un contrapeso de acero, se cierra la válvula esférica. Con este sistema se garantiza una maniobra siempre, aún en caso de fallo de corriente eléctrica. Como la válvula esférica es de doble excentricidad, el disco está descentrado respecto al eje y este último ligeramente respecto al cuerpo de la válvula.

Señales de monitoreo y control de la válvula de guarda:

- Posición del vástago de la válvula de derivación
- Presión de ecualización
- Presión de aplicación de sellos de operación
- Presión de aplicación de sellos de mantenimiento
- Posición del vástago del servomotor oleodinámico
- Señal de mando del PLC maestro hacia la electroválvula

Figura 63. Circuito oleodinámico de la válvula de guarda



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

Figura 64. **Válvula de guarda de retorno por contrapesos**



Fuente: *Válvulas y elementos de control para el sector de presas y centrales hidroeléctricas.*
www.comeval.es. Consulta: enero de 2017.

Las válvulas de guarda, de tipo esférico, se destinan a caudales menores que las válvulas de mariposa. También se les llama válvulas de salvaguardia, de seguridad o principal, pues ante una contingencia, esta válvula corta el paso de agua hacia el anillo de distribución, con velocidad relativamente lenta para evitar el golpe de ariete. No realizan funciones de regulación por lo que su funcionamiento es del tipo todo o nada.

Los ejes en acero inoxidable de alta resistencia mecánica aseguran la rotación del disco. Están montados sobre rodamientos autolubrificantes para evitar cualquier riesgo de enclavamiento en las maniobras bajo fuertes cargas, asegurando una rotación fiable.

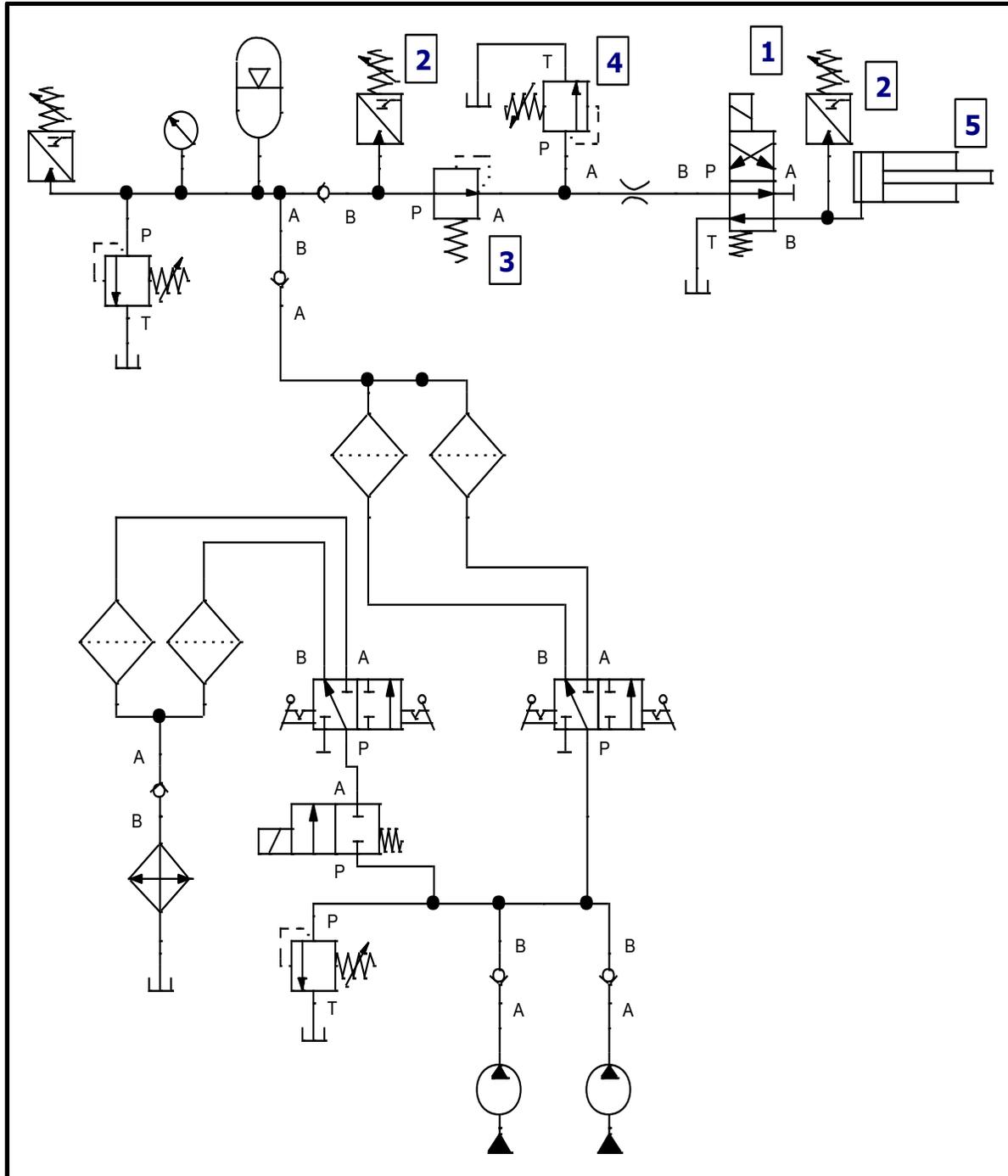
El diseño debe ser confiable a largo plazo, para lo cual, deben estar diseñados bajo criterios de normas, por ejemplo, DIN, ASME, AWWA, entre otros, y su necesidad de mantenimiento debe ser mínima, ya que su inspección o reparación implica la indisponibilidad de la turbina y del generador.

3.10. Funcionamiento de los frenos

En la figura 65, los cilindros oleodinámicos de simple efecto 5 aplican los frenos de fricción a través de una electroválvula distribuidora 4/2 vías 1, la cual es controlada por el PLC maestro cuando se alcanza el 20 % de la velocidad nominal de la turbina y así poder frenarla.

La presión de frenado se vigila por el presostato 2, por la válvula reguladora 3 se ajusta la presión y la válvula de seguridad 4 protege la línea de frenado. La señal de retroalimentación la envían los sensores de posición junto con los detectores de velocidad cuando la turbina está completamente parada.

Figura 65. Circuito oleodinámico de frenos



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

Figura 66. **Cilindro oleodinámico de frenos**



Fuente: elaboración propia.

La parte superior de un pistón oleodinámico tiene una zapata rectangular, enfocada con un disco compuesto de asbesto. El rotor del generador tiene un disco contra el cual se aplican los frenos cuando se inyecta aceite a presión a los cilindros oleodinámicos. Señales de monitoreo y control de los frenos oleodinámicos:

- Velocidad de la turbina
- Presión de frenado
- Posición de los cilindros oleodinámicos
- Señal de mando del PLC maestro hacia la electroválvula

3.11. Funcionamiento del sello de mantenimiento

El sello de mantenimiento se utiliza en la válvula esférica en el lado aguas arriba, proporcionando un sello estanco para propósitos de mantenimiento de la maquinaria hidráulica. Utiliza un sistema de sellado por compresión, donde el agua extraída de la tubería de presión comprime un disco metálico que se encuentra en el perímetro del disco y, en su posición de cierre, apoya contra un asiento en acero inoxidable que está en el interior del cuerpo de la válvula, de esta manera efectúa el sellado.

El disco metálico se encuentra expuesto a altas concentraciones de sedimentos agresivos y, por ello, sujeto a daños por erosión. Por lo anterior, componentes esenciales de los sellos de servicio y mantenimiento son recubiertos con productos de alta resistencia como tungsteno-carburo, lo que permite una mayor amplitud de los intervalos de mantenimiento.

3.11.1. Instrumentación

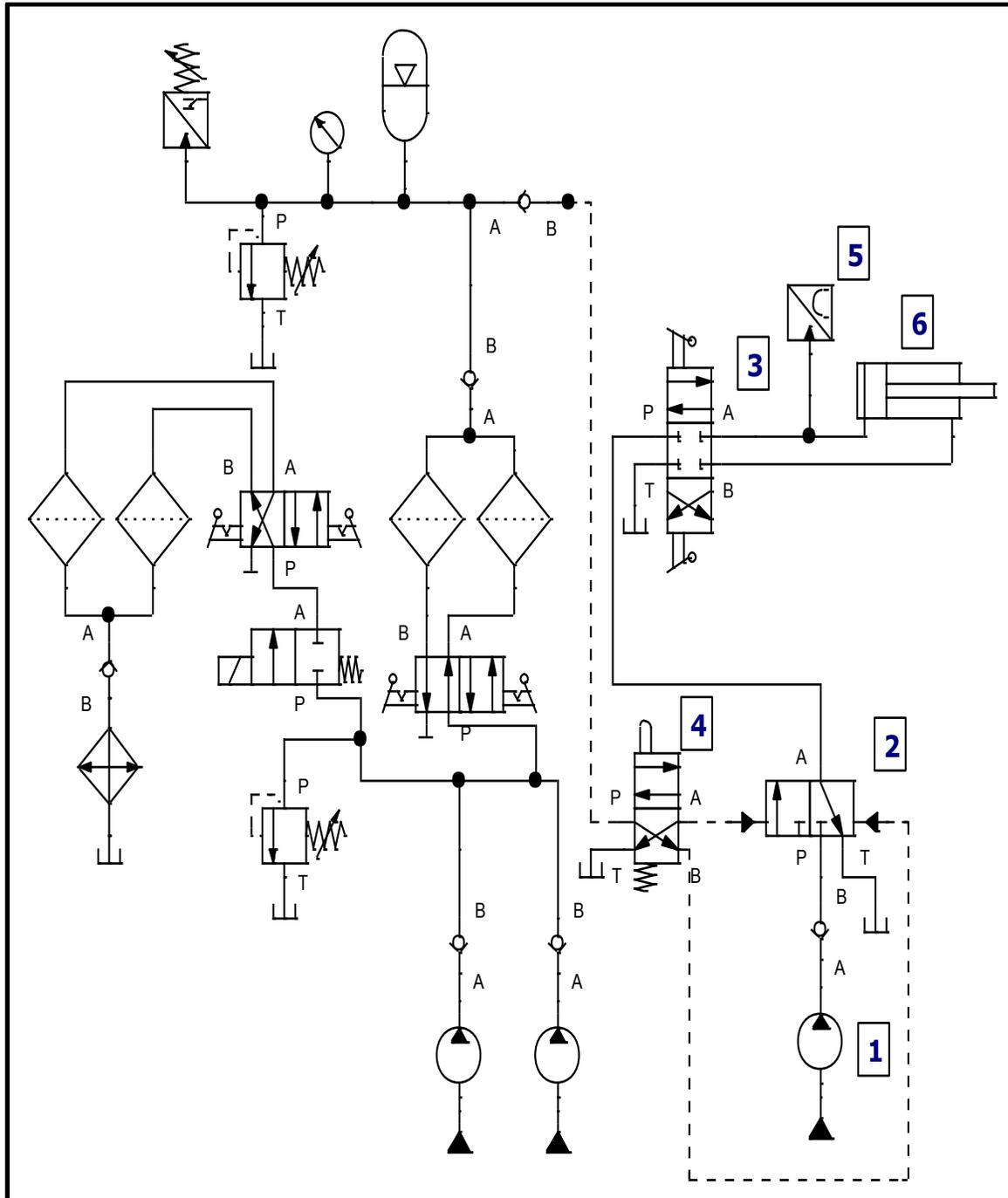
- Válvula distribuidora 3/2 vías con actuador hidráulico, 2: para controlar el flujo de agua de aplicación de sellos.
- Válvula distribuidora combinada 4/2 vías de bola con actuador manual 3, para aplicar manualmente los sellos y aceite de mando.
- Válvula distribuidora 4/2 vías retorno por resorte y accionada por embolo, 4: Para pilotar la válvula distribuidora 3/2 vías.
- Presostato, 5: para el control de la presión del sistema

Figura 67. **Válvula 4/2 vías con actuador manual de accionamiento del sello de mantenimiento**



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. Circuito oleodinámico del sello de mantenimiento



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

3.11.2. Aplicación del sello de mantenimiento

En la figura 68, el sello de mantenimiento solo puede ser aplicado cuando está cerrada la válvula de guarda, pues esta acciona el émbolo de la válvula distribuidora 4/2 vías 4, la cual pilota la válvula 3/2 vías 2, y abre el paso de agua al sistema de sellos.

Para aplicar el sello se gira manualmente 90° la palanca de la válvula combinada 4/2 vías 3, la cual deja pasar agua hacia la cámara de compresión del sello 6, representado como un cilindro oleodinámico de doble efecto. El presostato brinda la retroalimentación, cuando hay presión de agua en la línea. En el circuito oleodinámico la bomba hidráulica 1, representa la fuente de agua tomada de la tubería de presión.

Figura 69. **Válvula 4/2 vías accionada por émbolo**



Fuente: elaboración propia.

3.11.3. Desaplicación del sello de mantenimiento

En la figura 68, para desaplicar el sello de mantenimiento, únicamente se gira 90° la palanca de la válvula combinada 4/2 vías 3, debido a que se tiene presión en la línea de alimentación de agua porque la válvula principal se encuentra cerrada.

3.12. Funcionamiento del sello de operación

El sello de operación se utiliza en la válvula esférica en el lado aguas abajo, proporcionando un sello estanco cuando la válvula esférica se encuentra en posición cerrada. Utiliza un sistema de sellado por compresión, donde el agua extraída de la tubería de presión comprime un disco metálico que se encuentra en el perímetro del disco y en su posición de cierre apoya contra un asiento en acero inoxidable que está en el interior del cuerpo de la válvula.

Figura 70. Sello de operación



Fuente: *Válvulas y elementos de control para el sector de presas y centrales hidroeléctricas.*

www.comeval.es. Consulta: enero de 2017.

La doble excentricidad de la válvula esférica proporciona la ventaja de que el sello de operación esté libre de tensiones a los pocos grados de apertura y solo trabaja en la posición de cierre. Con esto se consigue doble estanqueidad para ambos sentidos del paso del agua. Se le llama sello de operación porque su aplicación y desaplicación se efectúa antes y después de la secuencia de arranque y parada de la unidad en operación normal.

3.12.1. Instrumentación

A continuación, se describen las válvulas distribuidoras 4/2 vías, las válvulas distribuidoras 3/2 vías y el respectivo presostato, el cual es imprescindible para el sello de operaciones.

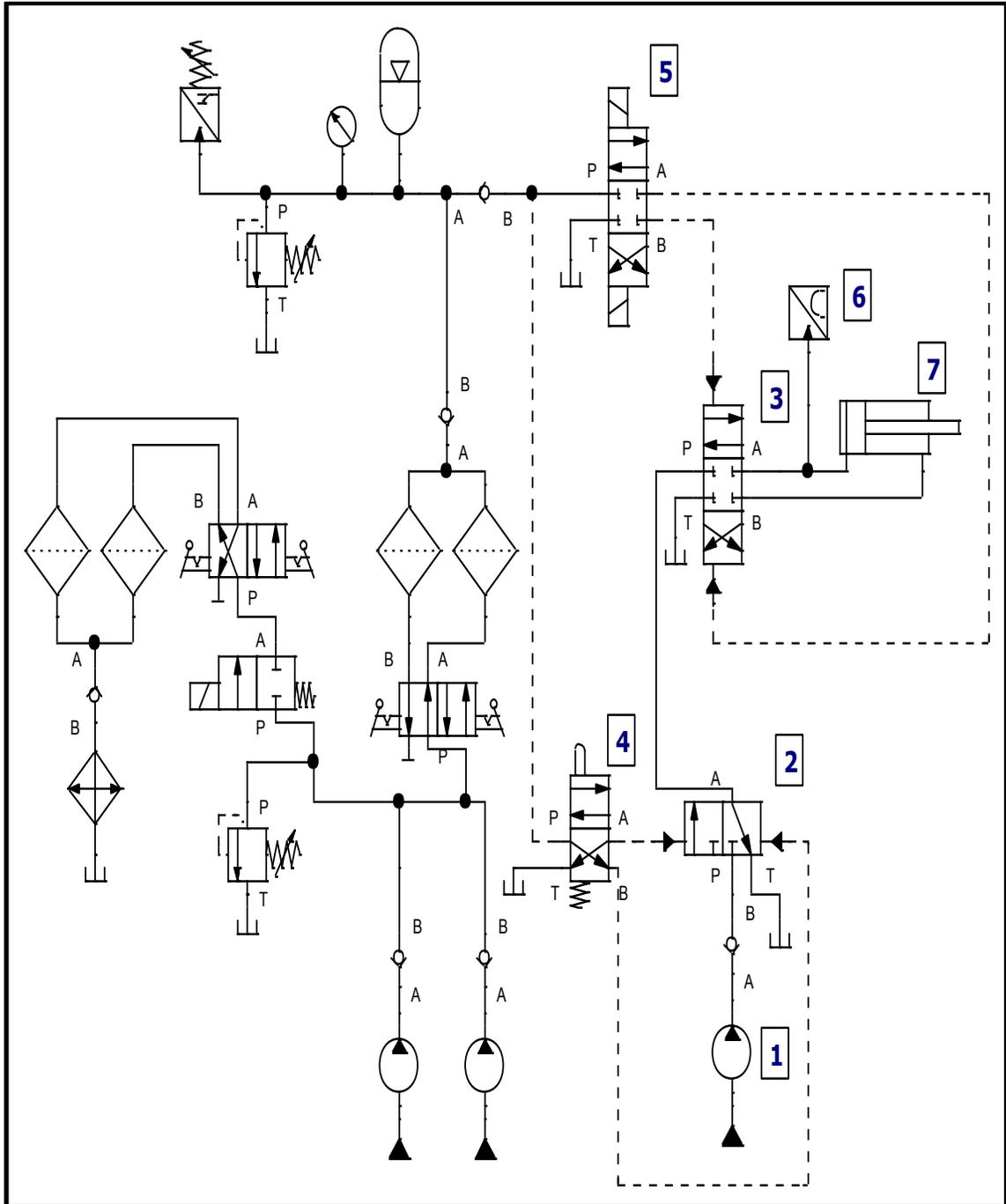
- Válvula distribuidora 4/2 vías operada por solenoide, 5: para pilotar la válvula 4/2 vías.
- Válvula distribuidora 4/2 vías con actuador hidráulico, 3: para aplicar el sello.
- Válvula distribuidora 3/2 vías con actuador hidráulico, 2: para controlar el flujo de agua de aplicación de sello.
- Válvula distribuidora 4/2 vías retorno por resorte y accionada por embolo, 4: para pilotar la válvula distribuidora 3/2 vías.
- Presostato, 6: para el control de la presión del sistema.

Figura 71. **Válvula 4/2 vías con actuador hidráulico para aplicación del sello de operación**



Fuente: elaboración propia.

Figura 72. Circuito oleodinámico del sello de operación



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

3.12.2. Aplicación de sello de operación

En la figura 72, una vez cerrada la válvula esférica, se tienen las condiciones necesarias para aplicar el sello de operación, pues la válvula 4/2 vías 4, quien controla la válvula 3/2 vías 2, permite el flujo de agua hacia la alimentación de la válvula hidráulica 4/2 vías 3, la cual es pilotada por la electroválvula 4/2 vías 5, cuando el PLC maestro da la orden de aplicación del sello 7, representado por un cilindro oleodinámico de doble efecto.

El presostato 6 brinda La retroalimentación, cuando hay presión de agua en la línea. En el circuito oleodinámico la bomba hidráulica 1, representa la fuente de agua tomada de la tubería de presión.

Figura 73. **Válvula 3/2 vías con actuador hidráulico**



Fuente: elaboración propia.

3.12.3. Desaplicación de sello de operación

En la figura 72, el PLC maestro manda a la electroválvula 4/2 vías 5, a pilotar la válvula 4/2 vías 3. La que desaplica el sello por medio del agua suministrada por la válvula 3/2 vías 2, accionada hidráulicamente por la válvula de mariposa a través del embolo de la válvula distribuidora 4/2 vías 4.

4. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA OLEODINÁMICO

4.1. Enfoque actual del mantenimiento de las centrales hidroeléctricas

El proceso operativo de una central hidroeléctrica es complejo cuando se analizan los procesos que intervienen; sobre todo, al clasificar las tareas, funciones, responsabilidades y roles de cada uno. Sin embargo al revisar los objetivos de cada planta, todo se resume en eficiencia, disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y calidad. Por tal razón se deben desarrollar las mejores prácticas operativas y de mantenimiento para alcanzar dichos objetivos.

Es un hecho de que el proceso de operaciones juega un papel esencial de la hidroeléctrica, y siendo un proceso clave en la cadena de valor de la central, la responsabilidad que recae sobre este proceso es muy grande, pero en muchas ocasiones menospreciada. Por ejemplo, los recursos asignados a operaciones no son suficientes para generar los objetivos perseguidos, como la gestión del conocimiento, herramientas adecuadas de trabajo, infraestructura, insumos, entre otros.

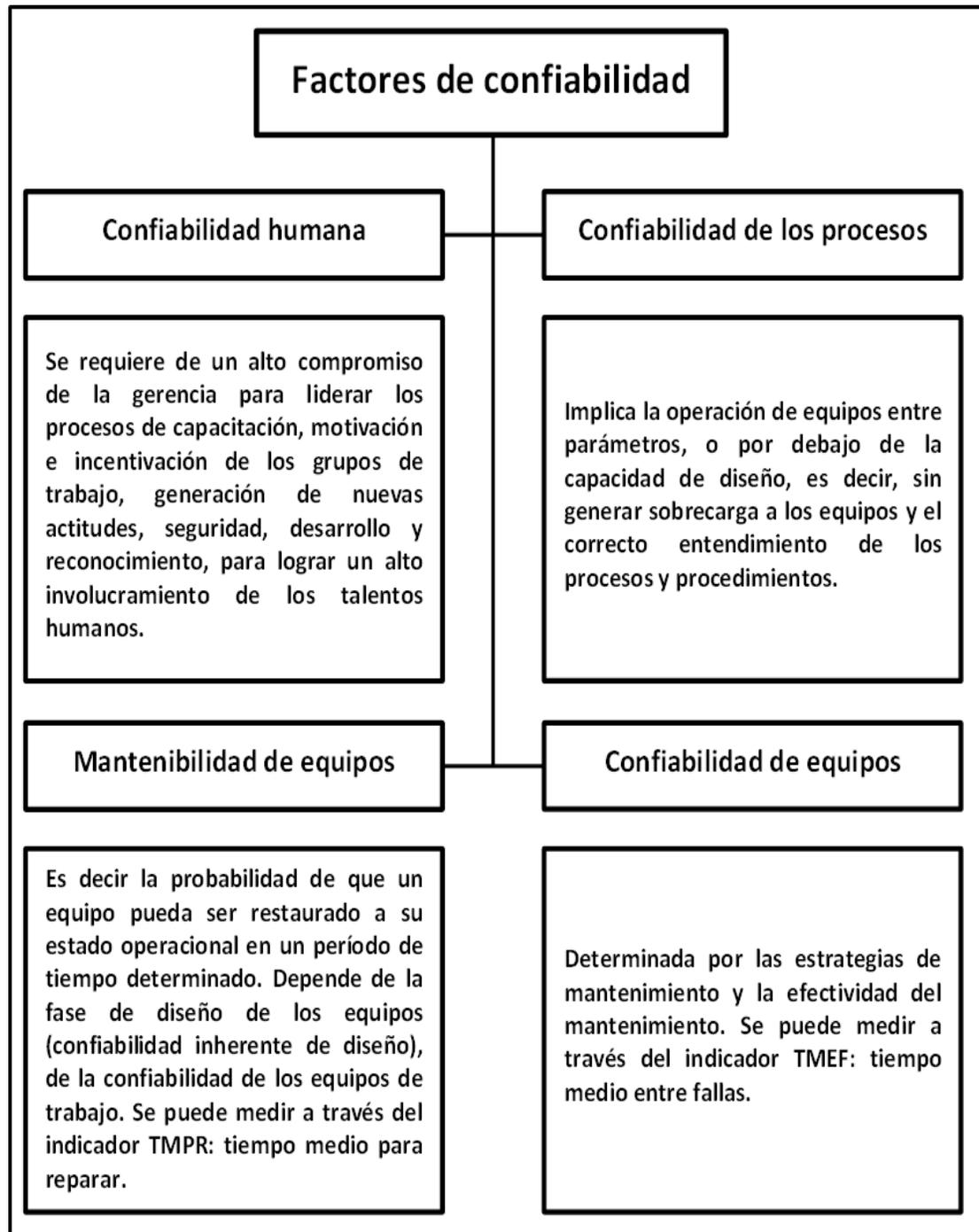
Los enfoques contemporáneos de mantenimiento permiten reducir costos a través de la optimización de la mano de obra, debido al involucramiento de los colaboradores en las diferentes tareas de la central. Las multihabilidades son capacidades explotadas en su afán por reducir costos y aumentar la eficiencia; cada habilidad es aprovechada para obtener resultados. De esta manera son evaluadas las necesidades de capacitación del personal.

Definir la política de mantenimiento aplicada a la central es muy importante al diseñar e implementar un sistema de mantenimiento, pues de ella se derivan los objetivos, las estrategias, el alcance, los recursos, los métodos, entre otros.

Las centrales eléctricas, en su afán por mantener los activos en óptimas condiciones se han basado en la confiabilidad operacional para solucionar los problemas de operación y de mantenimiento. La confiabilidad operacional se define como la capacidad de una instalación o un sistema integrado por procesos, tecnología, y gente, para cumplir su función dentro de los límites de diseño y bajo un contexto operacional específico.

La confiabilidad operacional depende de los siguientes factores:

Figura 74. Factores de confiabilidad operacional



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Mantenimiento productivo total aplicado a centrales hidroeléctricas

El mantenimiento productivo total tiene como propósito, en las acciones cotidianas, que los equipos operen sin averías y fallas, eliminar toda clase de pérdidas, mejorar la fiabilidad de los equipos emplear verdaderamente la capacidad industrial instalada. Cuando esto se ha logrado, el período de operación mejora, los costos son reducidos, el inventario puede ser minimizado y en consecuencia la productividad se incrementa. El mantenimiento productivo total busca fortalecer el trabajo en equipo, incremento en la moral del trabajador, crear un espacio donde cada persona pueda aportar lo mejor. Todo esto tiene el propósito de hacer del sitio de trabajo un entorno creativo, seguro, productivo y donde trabajar sea realmente grato.

4.1.1.1. Procesos fundamentales o pilares para implementar mantenimiento productivo total

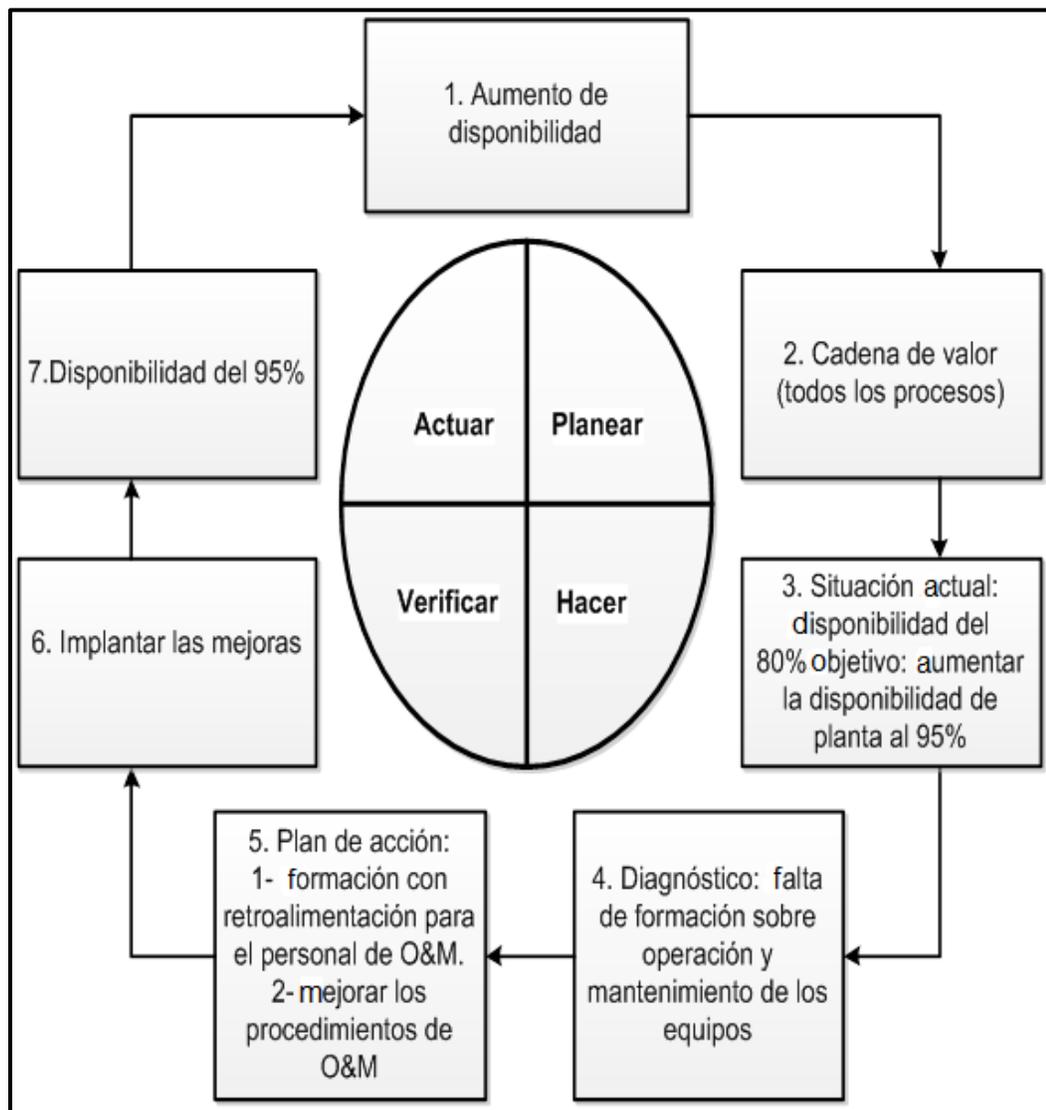
Estos pilares sirven de apoyo para la construcción de un sistema de producción ordenado. Se implantan siguiendo una metodología disciplinada, potente y efectiva. Los pilares del mantenimiento productivo total se lograron implementar como se muestra en el siguiente apartado.

4.1.1.1.1. Mejoras enfocadas

Debido a la previa implementación de un sistema de gestión de calidad, se facilitó la aplicación de los principios de la norma ISO 9001:2015 para apoyar las mejoras dirigidas al mantenimiento, pues el involucramiento de todos los procesos se orientaban en los mismos objetivos, maximizar la efectividad global

de equipos, procesos y plantas. Este es un ejemplo de la mejora enfocada para el aumento de disponibilidad de la central hidroeléctrica.

Figura 75. **Ciclo de mejora enfocada aplicado a una hidroeléctrica**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.1.2. Mantenimiento autónomo

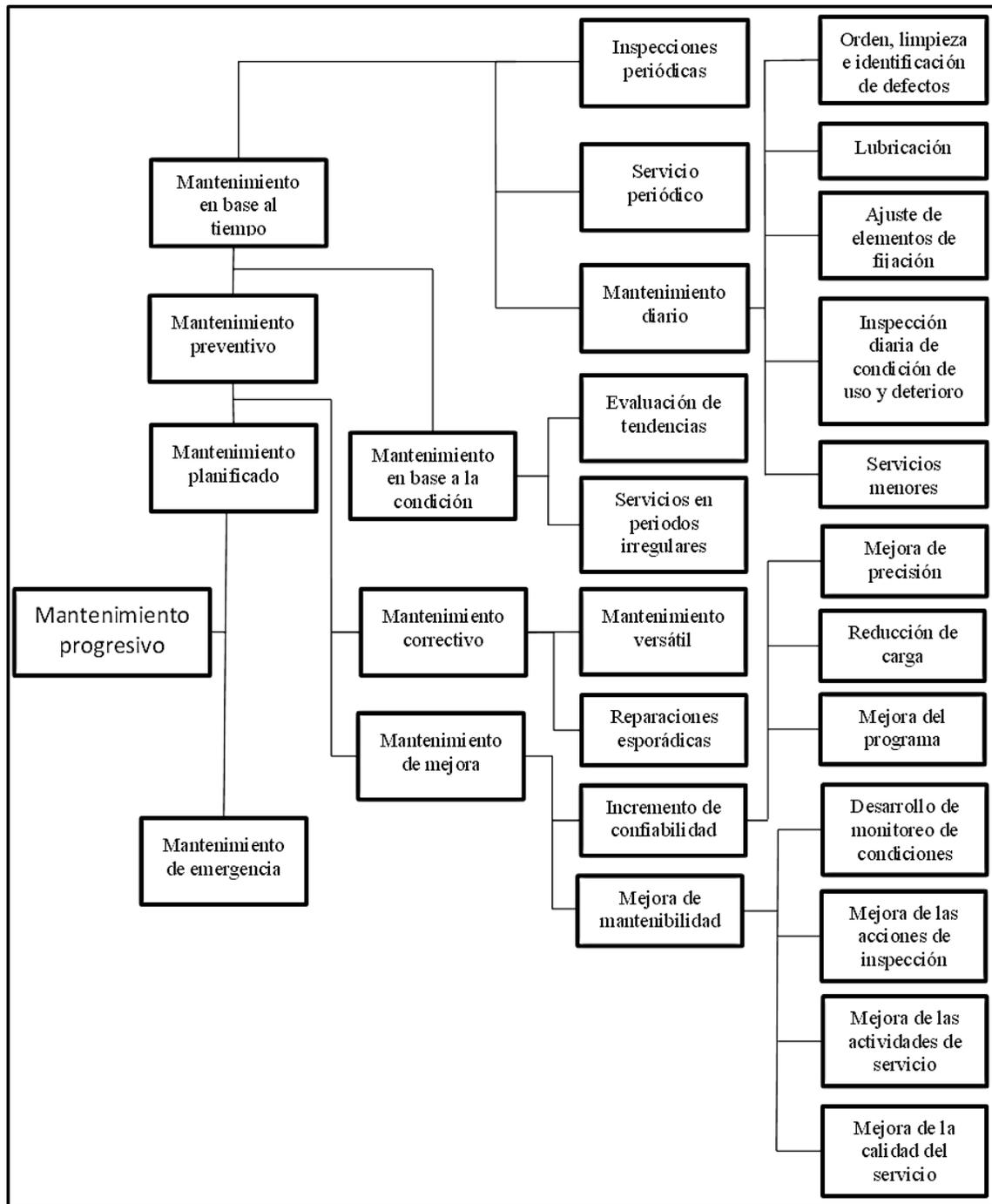
Se le brinda al proceso de operaciones el empoderamiento pertinente para responsabilizarse del mantenimiento del primer nivel de la central. Anterior a esto, se elaboró un programa de formación apoyado por fabricantes de equipos y profesionales de la central que, en su momento, fueron parte del comisionamiento y puesta en marcha de la hidroeléctrica. Aquí se identificaron tres características importantes que conlleva el automantenimiento.

- Creación de un lugar de trabajo grato y estimulante. Se mejoraron los ambientes de trabajo haciéndolos más ergonómicos y el salario se relacionó con los objetivos propuestos y alcanzados. De esta manera se motiva y eleva el espíritu de cooperación entre los procesos de la central.
- Limpieza como medio de verificación de funcionamiento del equipo. La limpieza como inspección se implementó por medio de la metodología 5S's mediante la cual se limpiaron, ordenaron, clasificaron, conservaron y estandarizaron las estaciones de trabajo. Además, se implementaron los procedimientos para desarrollar la mejora continua.
- Empleo de controles visuales. La señalización, implementación de código de colores para las tuberías, válvulas y dispositivos de seguridad, así como métricos de control sobre los equipos, se utilizaron para facilitar las labores de los operadores y mejorar el control del estado de cada uno.

4.1.1.1.3. Mantenimiento planificado o progresivo

Este pilar se implementó por medio de las siguientes actividades, las cuales se podrán observar en el siguiente flujograma el cual se presenta a continuación para una comprensión más precisa del mantenimiento planificado.

Figura 76. Acciones del mantenimiento progresivo

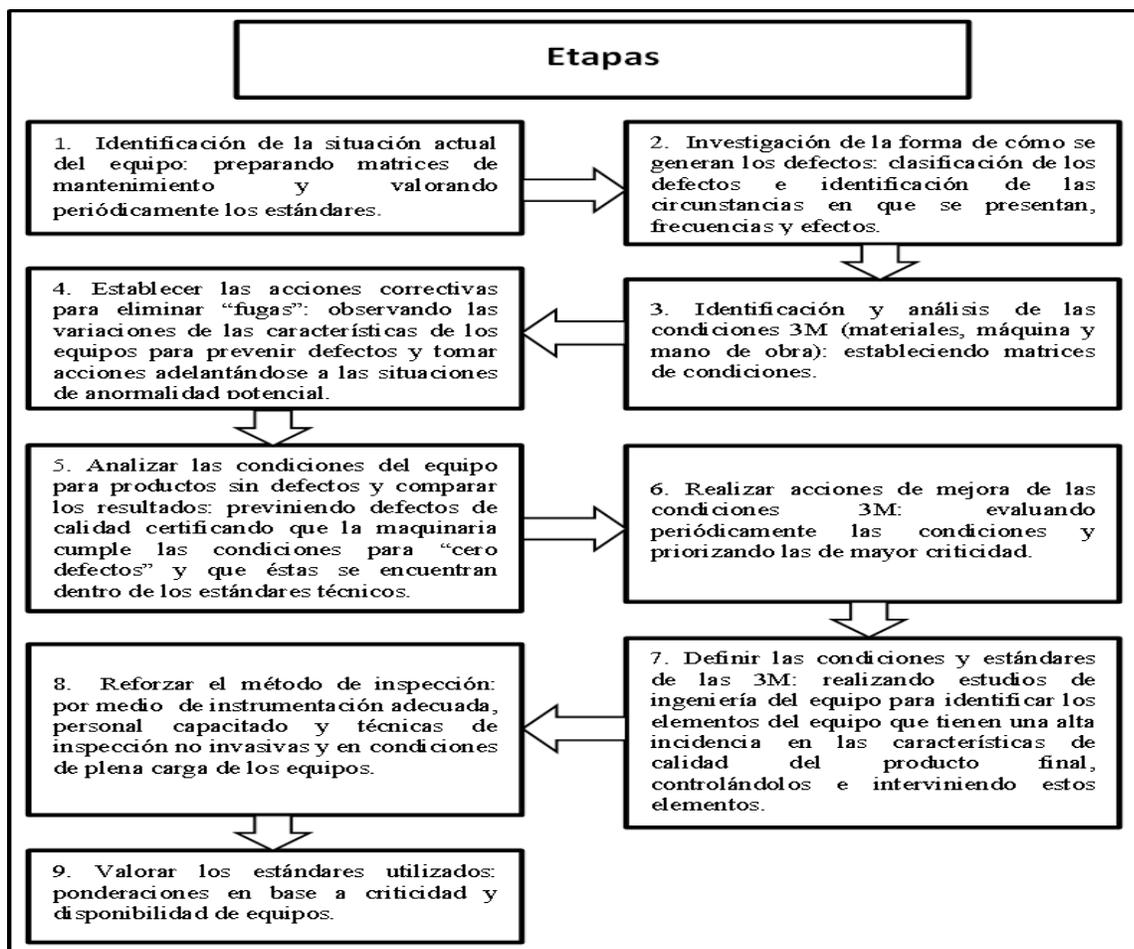


Fuente: elaboración propia.

4.1.1.1.4. Mantenimiento de calidad

El mantenimiento de calidad está clasificado por nueve etapas, se proporciona una identificación de la situación actual del equipo, asimismo una investigación de la forma de cómo se generan los defectos, siguiendo con la identificación y análisis de las condiciones 3m. De igual forma se muestra en la siguiente figura estas nueve etapas.

Figura 77. Ciclo de mantenimiento de calidad



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.1.5. Prevención del mantenimiento

Se llevó a cabo desde la fase de diseño y construcción, fiscalizando la economía y la funcionalidad de los equipos en una etapa temprana. Adicionalmente, en las fases de precomisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha de la central, se evaluó cada uno de los equipos para iniciar un historial de fallas, de funcionamiento y de mantenimiento, para predecir los comportamientos futuros y anticiparse a las fallas.

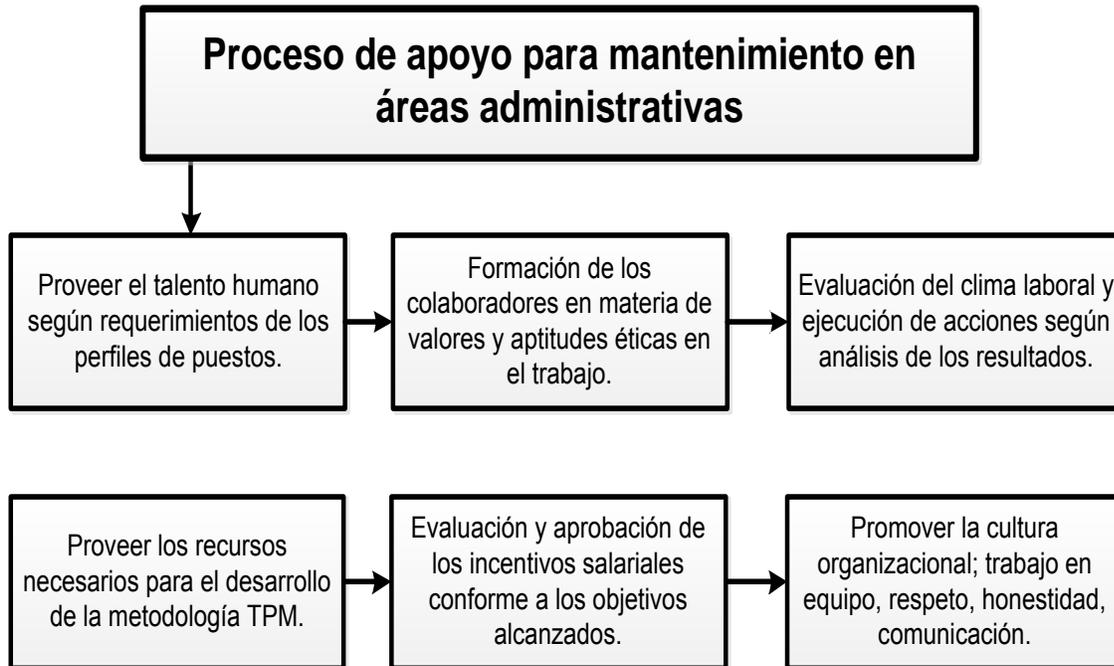
Algunas de las acciones tomadas fueron:

- Control de los planos “según construcción” como punto de partida, para identificar los elementos de los equipos, sus especificaciones y ajustes de operaciones y de protecciones.
- Análisis de las gráficas de especificaciones de equipos, según fabricantes.
- Análisis de eficiencia de equipos, según pruebas en sitio, comparándolas con las gráficas de especificaciones.
- Creación de bases de datos sobre frecuencias de averías y reparaciones.

4.1.1.1.6. Mantenimiento en áreas administrativas

A continuación, en la siguiente figura, se describen de forma más precisa, los procesos de apoyo para efectuar el mantenimiento en las áreas administrativas y que incluye al personal que labora en ellas. Acciones que fueron previamente definidas y posteriormente controladas por medio de estándares.

Figura 78. **Acciones del mantenimiento en áreas administrativas**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.1.7. Entrenamiento y desarrollo de habilidades

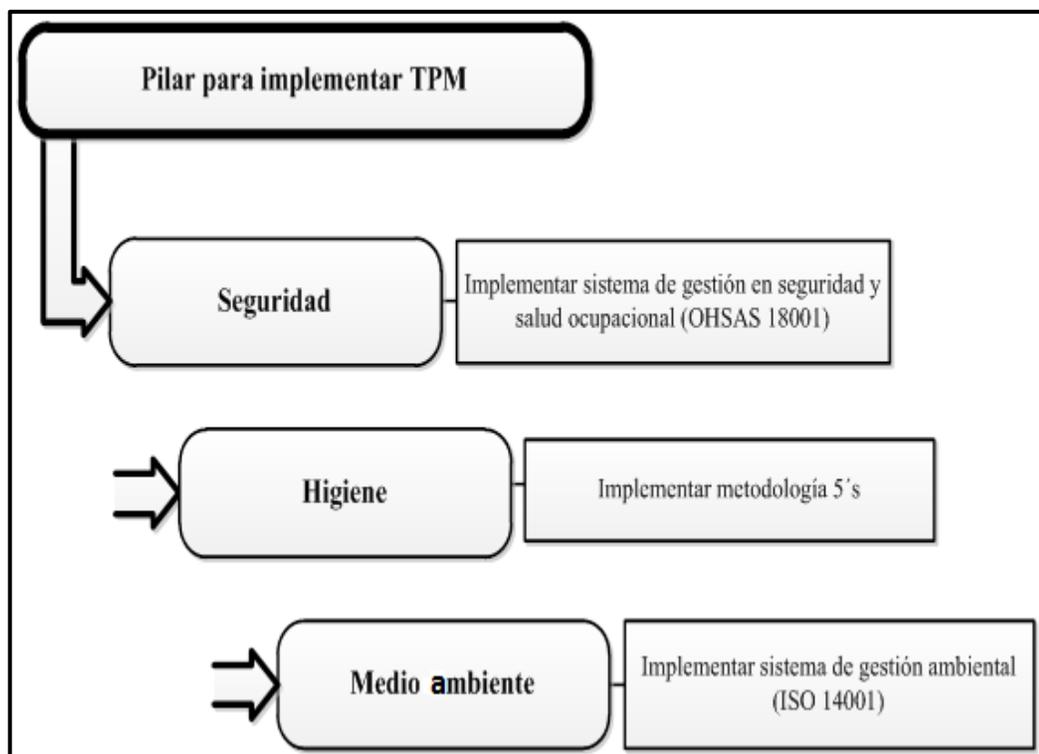
Aquí se realizaron evaluaciones teóricas y prácticas a los colaboradores del proceso de operaciones y mantenimiento, para determinar los diferentes tipos de razonamiento lógico, deductivo y matemático, utilizados en la resolución de problemas relacionados con el área de trabajo. También se tomaron los tiempos medios entre fallas como insumos para determinar la carencia de conocimientos. De esta manera, se implementó un programa de formación de habilidades laborales. El entrenamiento estuvo a cargo de profesionales de la central que, en su momento, fueron parte de la construcción, comisionamiento y puesta en marcha de la central.

Para temas muy específicos se recurrió a los proveedores de los equipos para consultoría en campo y adiestramiento del personal operativo y de mantenimiento.

4.1.1.1.8. Seguridad, higiene y medio ambiente

Del mantenimiento productivo total aplicado a centrales hidroeléctricas y de los procesos fundamentales o pilares, se muestran las siguientes acciones para la seguridad, higiene y medio ambiente con base en los sistemas de gestión ambiental.

Figura 79. Acciones para la seguridad, higiene y medio ambiente



Fuente: elaboración propia.

4.2. Técnicas de análisis de fallas

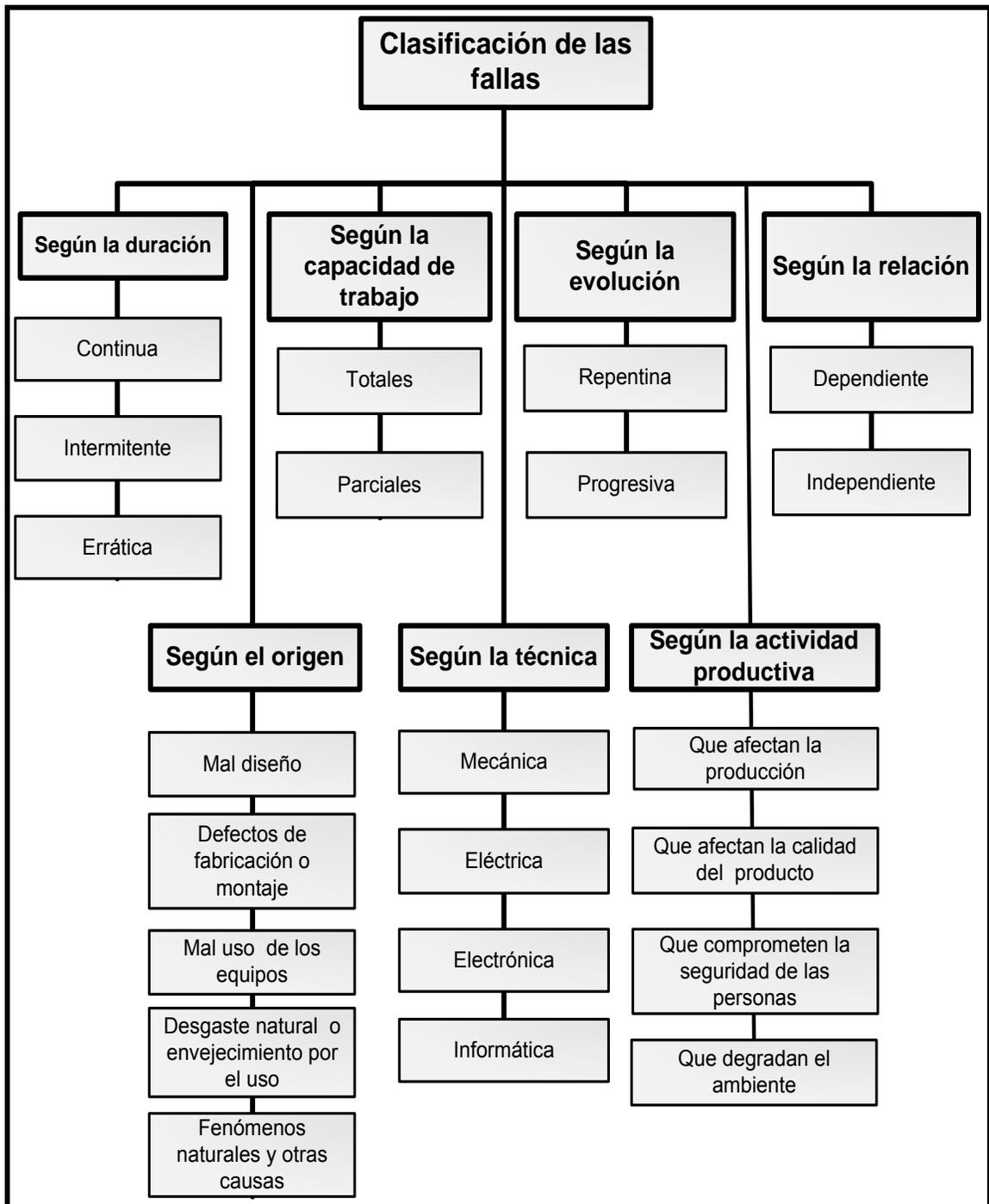
Cada tipo de falla necesita un procedimiento determinado para encontrar el modo de falla. Lo más importante es definir la causa y solucionarla por medio de métodos proactivos, enfocados a eliminar de raíz la falla. En la industria se considera una avería a cualquier anomalía que impida mantener los niveles de producción.

Pero el concepto es aún más amplio y debe tener en cuenta la falta de calidad del producto, la falta de seguridad, el mal aprovechamiento de la energía disponible y la contaminación ambiental.

En la figura 80, se expone la clasificación de las fallas desde diferentes puntos de vista. Es importante mencionarlo, pues las fallas interesan a los departamentos de mantenimiento, de operaciones y a los departamentos administrativos por los costos de parada, costos de mantenimiento, depreciación de activos y su consecuente obsolescencia, entre otros.

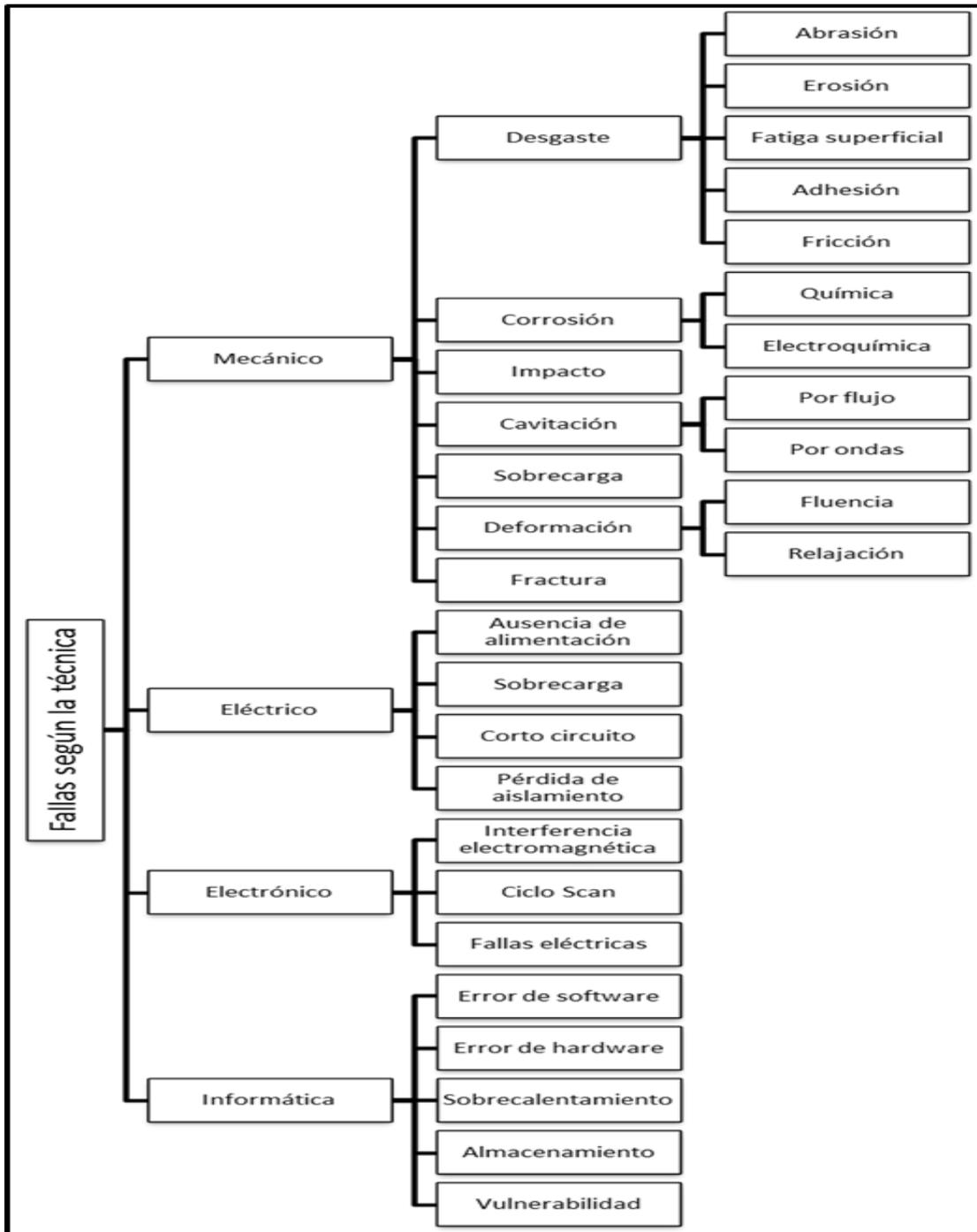
En la figura 81, se especifican las fallas desde el punto de vista técnico, donde el origen de la falla obedece un comportamiento predecible bajo términos de ingeniería, por ejemplo, el desgaste puede ser provocado por abrasión, erosión, fatiga superficial, entre otros.

Figura 80. Clasificación de las fallas



Fuente: elaboración propia.

Figura 81. Tipos de falla según la técnica



Fuente: elaboración propia.

Esta tabla describe algunas de las fallas clasificadas según la técnica que, generalmente, son las que se presentan en la industria. El desglose puede seguir extendiéndose, dependiendo del equipo analizado y de las condiciones de operación, donde varios tipos de fallas pueden converger para deshabilitar la función de un elemento de máquina.

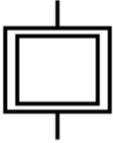
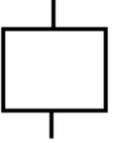
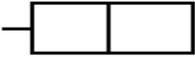
Existen diferentes filosofías para analizar las fallas. Sin embargo, este estudio no tiene como objetivo definir dichas teorías. La siguiente descripción hace énfasis en las prácticas más utilizadas para tratar el tema.

4.2.1. Grafcet

Un automatismo secuencial es aquel en el que las salidas en cada instante dependen de las entradas en aquel instante, de los estados anteriores y de su evolución. Esta es la razón por la cual se utiliza esta herramienta para describir el automatismo del equipo oleodinámico, pues a pesar de que se puede operar de modo automático, también se puede hacer de modo manual. Visualizando cada etapa se puede entender la forma en que opera cada elemento.

De esta manera se analizan mejor los eventos y secuencias del proceso completo. Las etapas describen las acciones correspondientes y las transiciones describen los criterios que se deben cumplir para continuar con la siguiente etapa, hasta cumplir la función desempeñada por cada componente del equipo.

Tabla IV. **Símbolos utilizados en grafcet**

Símbolo	Nombre	Descripción
	Etapa inicial	Indica el comienzo del esquema GRAFCET y se activa al poner a correr el autómata. Por lo general suele haber una sola etapa de este tipo.
	Acción	Acciones que se realizan al activarse la etapa a la que pertenecen.
	Etapa	Su activación lleva consigo una acción o una espera.
	Unión	Las uniones se utilizan para unir entre sí varias etapas.
	Transición	Condición para desactivarse la etapa en curso y activarse la siguiente etapa, Se indica con un trazo perpendicular a una unión.
	Acciones asociadas	Acciones que se realizan al activarse la etapa a la que pertenecen.

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Análisis del modo y efecto de fallas

Este análisis es probablemente el método más usado y efectivo de análisis de confiabilidad. En la central se aplicó esta metodología aplicando las siguientes preguntas para cada equipo:

- Cómo puede fallar el componente
- Cuáles son las consecuencias de tal falla
- Cuál es la criticidad de las consecuencias
- Cómo puede detectarse la falla
- Cuáles son las salvaguardias contra la falla

Los pasos para elaborar el análisis de modo y efecto de fallas fueron los siguientes:

- Establecer el alcance del análisis: se delimitaron las áreas y sistemas conforme el flujo de proceso. Las fronteras se limitaron por sistema y la profundidad del análisis fue en función de la criticidad y con determinados niveles de distribución.
- Recopilar la información necesaria: se analizaron los planos según construidos, manuales de fabricación, modificaciones y mejoras de los equipos.
- Preparar la lista de componentes: según los planos. Se tomaron en cuenta las siguientes especificaciones:
 - Funciones
 - Condiciones de operación
 - Condiciones ambientales
- Llenar las fichas: se elaboraron con base en el formato establecido y con los siguientes criterios.

Tabla V. **Gravedad del fallo**

Ponderación de la gravedad del fallo	
Criterio	Índice
Muy leve, casi imperceptible	1-2
Leve	3-4
Gravedad moderada	5-6
Gravedad alta	7-8
Muy grave	9-10

Fuente: elaboración propia.

Esta tabla también se puede interpretar de la siguiente manera:

- 1-2 Insignificante, el efecto sobre la confiabilidad y/o disponibilidad es mínimo.
- 3-4 Menor, no afecta la seguridad, pero si la confiabilidad y disponibilidad.
- 5-6 Mayor, no afecta la seguridad, pero si la confiabilidad y disponibilidad de manera importante.
- 7-8 Superior, afecta la seguridad, confiabilidad y disponibilidad.
- 9-10 Crítica, afecta la seguridad, confiabilidad y disponibilidad de manera importante.

Tabla VI. **Probabilidad de ocurrencia**

Ponderación de probabilidad de ocurrencia	
Criterio	Índice
Casi improbable	1-2
Baja probabilidad	3-4
Probable	5-6
Alta Probabilidad	7-8
Casi con certeza	9-10

Fuente: elaboración propia.

Quando se dispone del tiempo medio entre fallas, se utiliza este indicador para establecer el índice correspondiente para apoyar la exactitud de la probabilidad.

Tabla VII. **Probabilidad de no detección**

Ponderación de la probabilidad de no detección	
Criterio	Índice
Casi improbable que los controles que no detecten el fallo	1-2
Baja probabilidad de no detección	3-4
Probabilidad media	5-6
Alta probabilidad de no detección	7-8
Probabilidad muy alta de no detectar el fallo	9-10

Fuente: elaboración propia.

Los controles de detección se abarcaron de la siguiente manera:

- Listas de verificación: por medio de inspecciones programadas
- Análisis de condiciones: Por medio de mantenimiento predictivo

Tabla VIII. **Formato análisis de modo y efecto de falla**

AMEF																
ANÁLISIS DEL MODO Y EFECTO DE LA FALLA																
Sistema:		Número del equipo:				Número de componente:				AMEF Tipo:		Fecha:				
		Modelo del equipo:				Modelo de pieza:				Realizado por:						
Descripción del equipo	Función del equipo	Modo de falla	Efecto de la falla	Causa de la falla	Situación actual					Acción recomendada	Responsable	Situación actual				
					Acciones actuales- controles	Gravedad	Ocurrencia	Detección	NPR			Acciones adoptadas	Gravedad	Ocurrencia	Detección	NPR

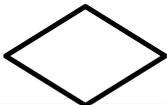
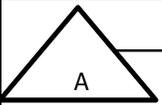
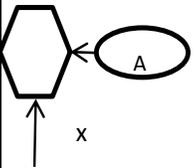
Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Árboles de falla

Este análisis de confiabilidad se utiliza en la central para determinar los posibles modos de falla en el componente, que pueden desencadenar eventos no deseados al inicio del análisis. También se utilizan para calcular la probabilidad de ocurrencia del evento en estudio a partir de la probabilidad de ocurrencia de las fallas de los componentes.

Desde temprana etapa se registraron las fallas iniciales, para ser insumos de la base de datos de todas las causas raíces de las fallas. A cada evento no deseado se le dio una ponderación de ocurrencia para tener una base sólida de toma de decisiones con base en la información. Tanto los eventos principales como los eventos básicos fueron registrados. Símbolos usados en la elaboración de árboles de falla:

Tabla IX. **Simbología de árboles de falla**

Símbolo	Nombre	Descripción
	Rectángulo	Evento de falla, usualmente es resultado de otros eventos
	Círculo	Evento de falla primario, independiente
	Diamante	Evento de falla cuyas causas no han sido desarrolladas
	Compuerta lógica "OR"	El evento de salida ocurre si uno o más de los eventos de entrada ocurre
	Compuerta lógica "AND"	El evento de salida ocurre si y solo si todos los eventos de entrada ocurren
	Triángulo IN	Representa una rama del arbol desarrollado en otro lado
	Triángulo OUT	El arbol A es una rama del arbol desarrollado en otro lado
	Inhibit	El evento salida ocurre cuando X y la condición A se presenta

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Análisis de Pareto

En este análisis evalúa los costos de mantenimiento, los sistemas o componentes que causan las mayores fallas y el tiempo indisponible por falla.

Es una herramienta para invertir los recursos, cuya prioridad los recursos humano y económico, debido a que los resultados evidencian las zonas de mayor a menor criticidad.

El resultado de este análisis se divide en tres zonas: A, B, y C. La zona A muestra que aproximadamente 20 % de las fallas producen el 80 % de los costos; las fallas en esta zona deben ser claramente priorizadas. En la zona B se concentra el 15 % de los costos, que son producidas por el 30 % de las fallas. La zona C solo se concentra en el 5 % de los costos producidos por el 50 % de las fallas. Estas fallas tienen la prioridad de solución más baja.

Criterios de mantención en base al análisis de Pareto:

- Los componentes de la zona A deben recibir los mayores esfuerzos de mantención: un programa de mantención preventiva, monitoreo de su condición, nivel adecuado de *stock* de repuestos.
- Un esfuerzo menor se concentrará en las maquinas pertenecientes al grupo B.
- Los elementos del grupo C no requieren mantenimiento preventivo hasta una nueva evaluación.

4.3. Mantenimiento del equipo oleodinámico

Cuando se aplica mantenimiento al equipo oleodinámico se debe considerar que es un circuito complejo, debido a que la fuente de potencia oleodinámica alimenta a más de un circuito. Por ello, primero se mostrarán los diferentes circuitos, después, se enlistan los elementos de cada uno.

Luego se analizarán las fallas de cada equipo en conjunto con sus elementos, por medio de Grafcet, arboles de falla, análisis del modo y efecto de

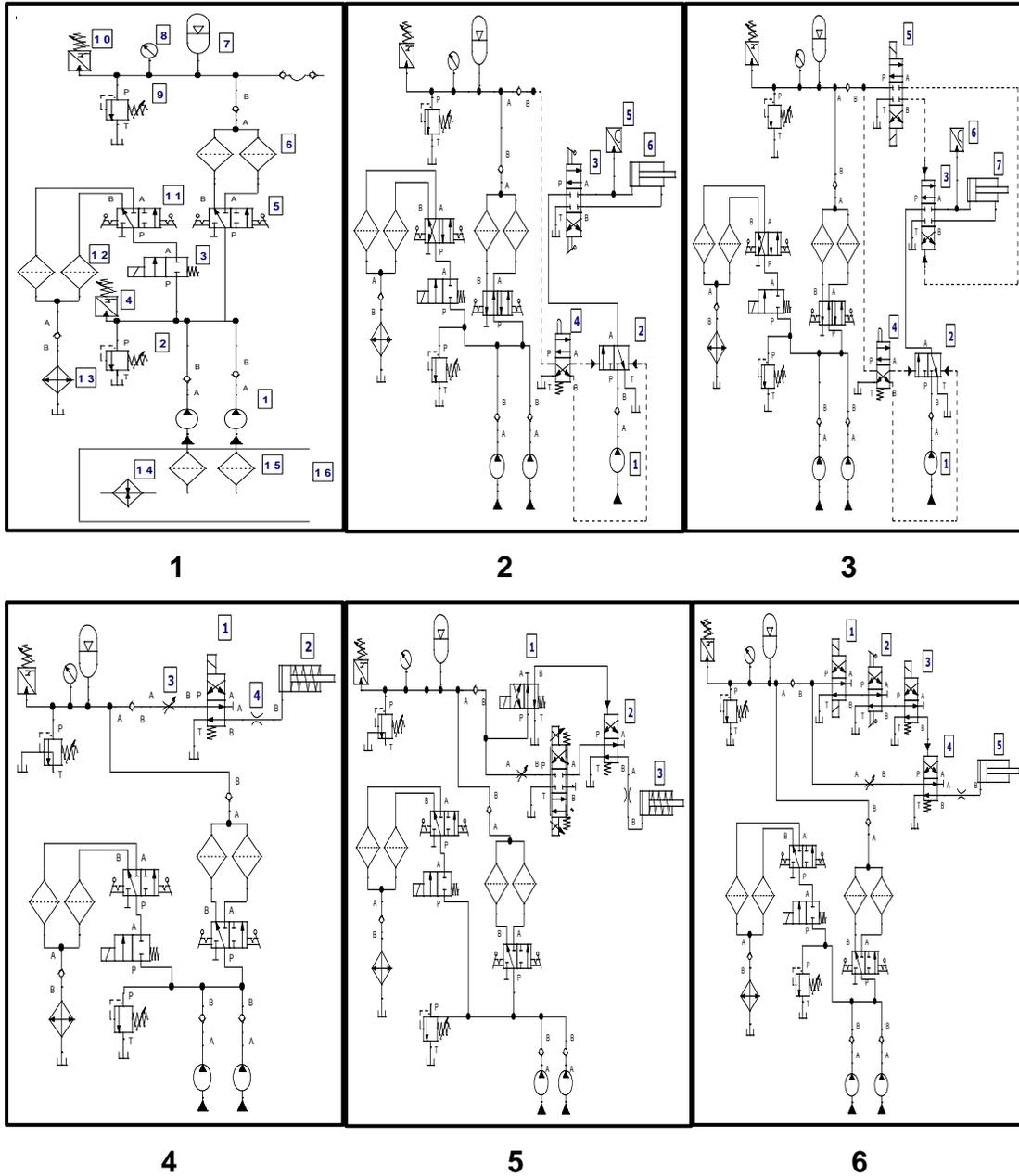
falla y Pareto. Por último, se describirán las acciones tomadas en los diferentes tipos de mantenimiento de toda la unidad oleodinámica de potencia.

4.3.1. Circuitos oleodinámicos

Los circuitos oleodinámicos son partes indispensables para un óptimo funcionamiento de una hidroeléctrica. Se enumeran y representan por medio de diagramas los cuales se muestran a continuación, en la figura 82.

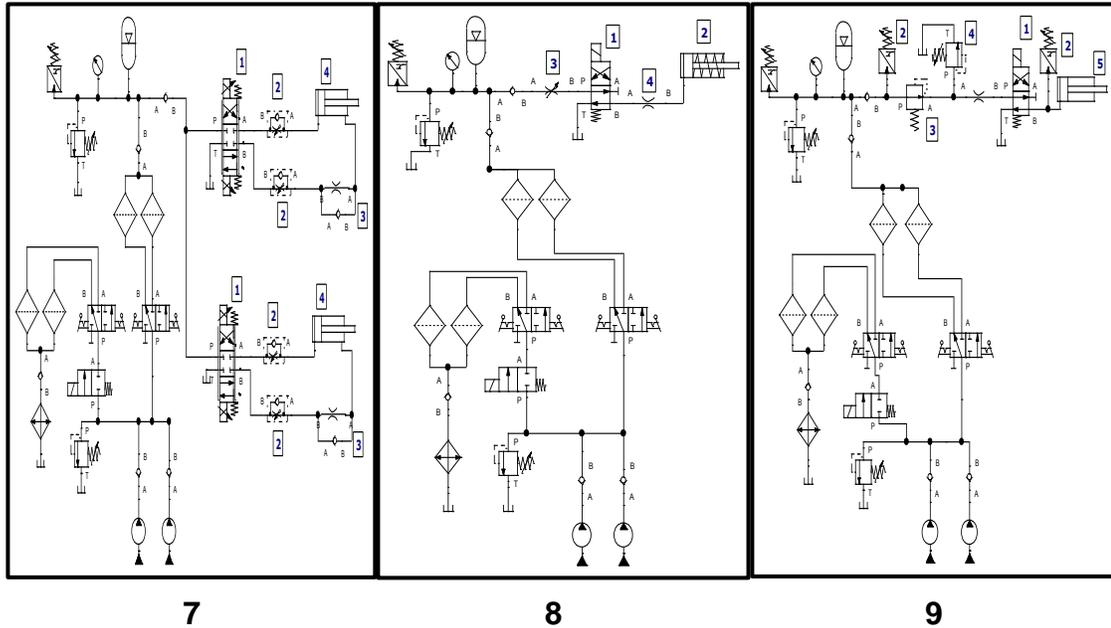
1. Unidad oleodinámica de presión
2. Sello de mantenimiento
3. Sello de operación
4. Válvula de derivación
5. Cierre rápido del deflector
6. Válvula de guarda
7. Inyectores
8. Inyector de frenado
9. Frenos

Figura 82. Circuitos oleodinámicos



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim4.5.

Continuación de figura 82.



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

4.3.2. Lista de equipos

La siguiente tabla muestra las partes y componentes de una unidad oleodinámica de presión y específicamente sus partes, su cantidad y componente para el mantenimiento del equipo oleodinámico. Esta tabla es parte de la ficha técnica, que permite clasificar las partes y componentes para establecer la base del plan de mantenimiento.

Tabla X. **Partes y componentes de la unidad oleodinámica de alta presión**

Parte	Cantidad	Componente	Cantidad
Bloque de válvulas, línea principal	1	Válvula de seguridad	1
		Presostato	2
		Manómetro	1
Válvula manual selectora de filtro de retorno	1	Filtros	2
		Indicador de filtros saturados	2
		Válvula antirretorno	1
Acumulador neumático	1	Sensor de nivel de aceite	3
		Sellos	2
		Accesorios	6
Deposito	1	Sensor de nivel de aceite	1
		Sensor de temperatura de aceite	1
Válvula manual selectora de filtro de presión	1	Filtros de presión	2
		Indicador de filtros saturados	2
		Válvula antirretorno	1
Bloque de válvulas (línea de presión)	1	Electroválvula 2/2 vías	1
		Presostato	1
		Válvula de seguridad	1
Calentador de aceite	1	Resistencia eléctrica	1
	1	Termostato	1
Enfriador de aceite	1	Intercambiador de calor de tubos	1
		Válvula termostática	1
Bomba	2	Acoplamiento mecánico	2
		Filtro de aspiración	2
		Motor eléctrico	2
		Válvula antirretorno	2
Bloque de válvulas	1	Electroválvula 4/2 vías	1
		Electroválvula 4/2 vías con enclavamiento, sellos de servicio	1
		Electroválvula 4/2 vías con enclavamiento, contrachorro	1
Bloque de válvulas	1	Electroválvula 4/2 vías, válvula de guarda	1

Fuente: elaboración propia.

Continuación de tabla X.

Parte	Cantidad	Componente	Cantidad
Bloque de válvulas	1	Válvula 4/2 vías pilotada, válvula principal	1
		Presostato de línea de frenado	1
		Presostato de aplicación de frenos	1
		Electroválvula 4/2 vías, frenos	1
		Válvula de seguridad	1
		Válvula reguladora de presión	1
Bloque de válvulas	1	Electroválvula 4/2 vías, cierre rápido	1
		Electroválvula proporcional	1
		Válvula 4/2 vías pilotada, válvula principal	1
Bloque de válvulas	1	Electroválvula proporcional	6
Cilindros oleodinámicos de simple efecto de retorno por muelle	3	Sensores de posición	2
		Sellos	2
		Sensores de desplazamiento	1
Cilindros oleodinámicos de doble efecto de retorno por muelle	6	Sensores de desplazamiento	6
		Sellos	2
Cilindros oleodinámicos de doble efecto de	2	Sensores de posición	2
		Sellos	2
Cilindros oleodinámicos de simple efecto	3	Sensores de posición	3
		Sellos	2
Válvula 4/2 vías accionada por embolo	1		
	1		
Válvula 4/2 vías pilotada hidráulicamente	1		
	1		
Presostatos	2		

Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Análisis operativo por medio de Grafcet

Una vez se conocen las partes y componentes, se analizarán las acciones realizadas por el equipo oleodinámico en condiciones de operación normal. Se utilizará la herramienta Grafcet, dada su eficiencia para describir todas las acciones, permisivos y relaciones entre cada una y permite analizar automatismos con varias etapas simultáneas utilizando el lenguaje normal.

La nomenclatura de la tabla XI se utiliza para describir las acciones y transiciones de las figuras 83 y 84. Para mayor referencia de interpretación de un grafcet se puede consultar la bibliografía relacionada, pues este tratado no tiene como objetivo describir los principios de este sistema.

Tabla XI. **Nomenclatura de símbolos usados en grafcet**

Símbolo	Interpretación
A1	Señal de arranque, manual o automático
NA1	Sensor de nivel de aceite
TA	Sensor de temperatura de aceite
PA	Presostato de acumulador neumático
NA2	Sensor de nivel de aceite de acumulador
SM1	Sensor de posición de sello de mantenimiento
SM2	Presostato de aplicación de sello de mantenimiento
SO1	Sensor de posición de sello de operación
SO2	Presostato de aplicación de sello de operación
VG	Sensor de posición de válvula de guarda

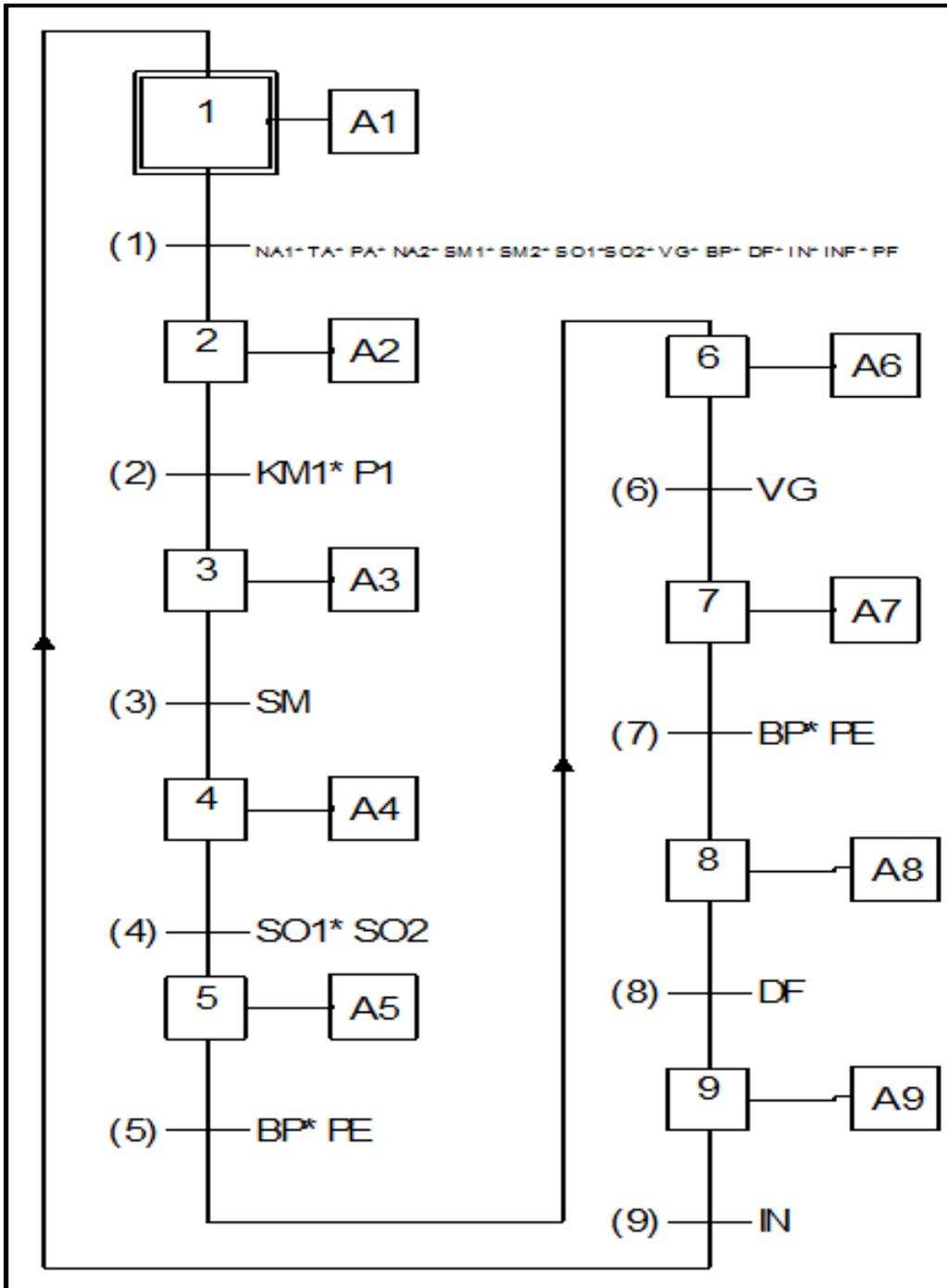
Fuente: elaboración propia.

Continuación de tabla XI.

Símbolo	Interpretación
BP	Sensor de posición de válvula de derivación
DF	Sensor de posición del deflector
PE	Presostato de ecualización de presión
IN	Sensor de desplazamiento de inyectores
INF	Sensor de posición de inyector de frenado
PF	Presostato de aplicación de frenos de fricción
P1	Presostato de línea de presión oleodinámica
A2	Arrancar bomba
KM1	Contactador de arranque de bomba
KM2	Contactador de paro de bomba
A3	Comprobar desenclavamiento de sello de mantenimiento
A4	Desaplicar sello de operación
A5	Abrir válvula de derivación
A6	Abrir válvula de guarda
A7	Cerrar válvula de derivación
A8	Abrir deflector
A9	Abrir inyectores
A10	Señal de paro (manual o automático)
A11	Cerrar inyectores
A12	Cerrar deflector
A13	Cerrar válvula de guarda
A14	Abrir inyector de frenado
A15	Aplicar frenos de fricción
A16	Cerrar inyector de frenado
A17	Aplicar sello de operación
A18	Desaplicar frenos de fricción
A19	Parar bomba

Fuente: elaboración propia

Figura 83. Secuencia operación



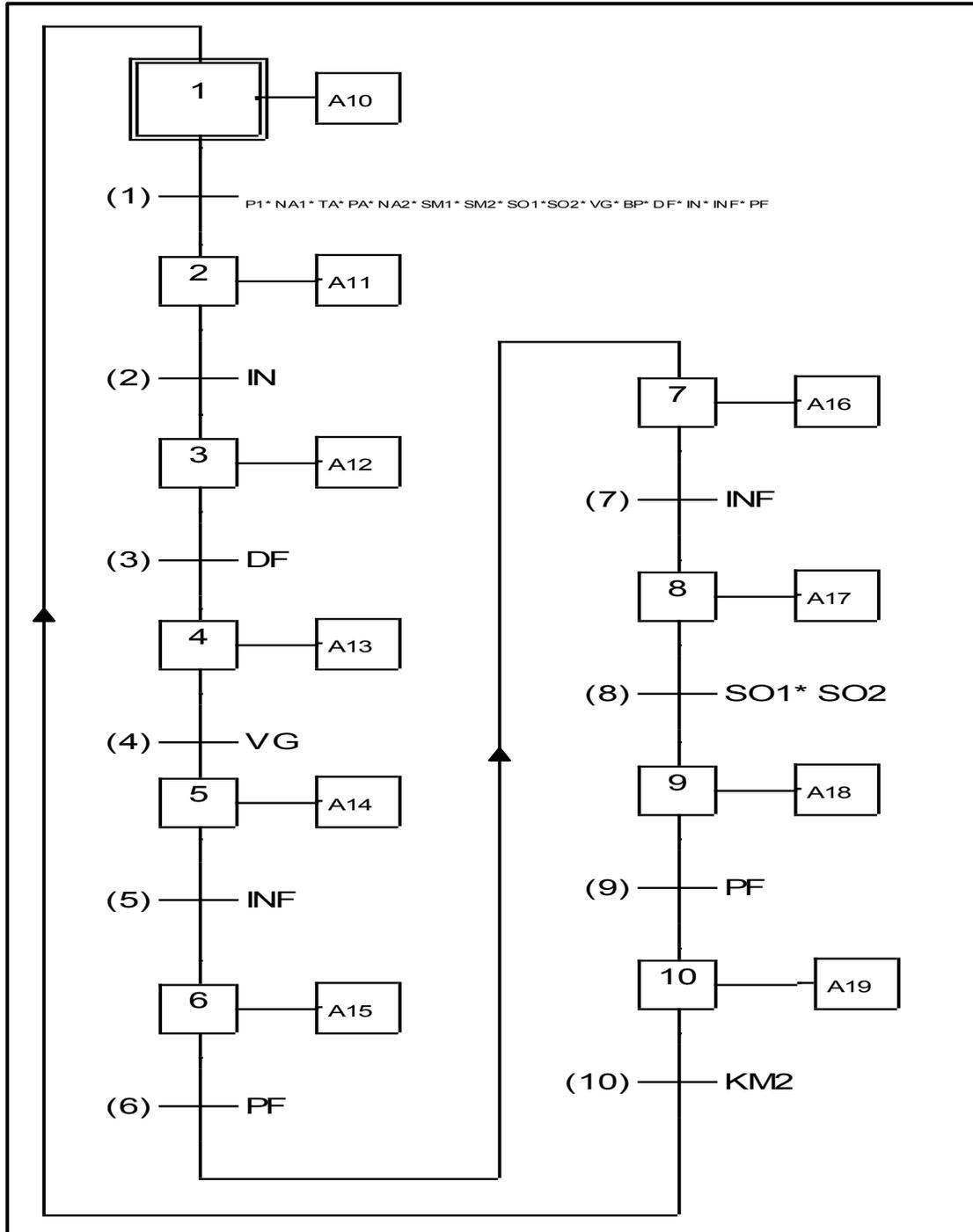
Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

Se puede observar en la figura 83 que, para arrancar la bomba, primero se deben comprobar las condiciones iniciales del equipo oleodinámico, como lo son nivel de aceite, temperatura de aceite, presión del acumulador neumático, entre otros.

De esta manera se verifica que todas las condiciones preoperativas estén dentro de los rangos permisibles. El arranque se puede hacer de forma automática y manual. En el modo automático también se puede hacer paso a paso, donde su característica principal es que se deshabilitan las funciones de retardos de entrada de los sensores.

El modo manual se utiliza para probar los equipos ya sea por mantenimiento o por pruebas periódicas. Su característica principal es que algunas funciones de retroalimentación se deshabilitan, es decir, los circuitos cerrados de control se abren.

Figura 84. Secuencia de parada



Fuente: elaboración propia, utilizando Festo FluidSim 4.5.

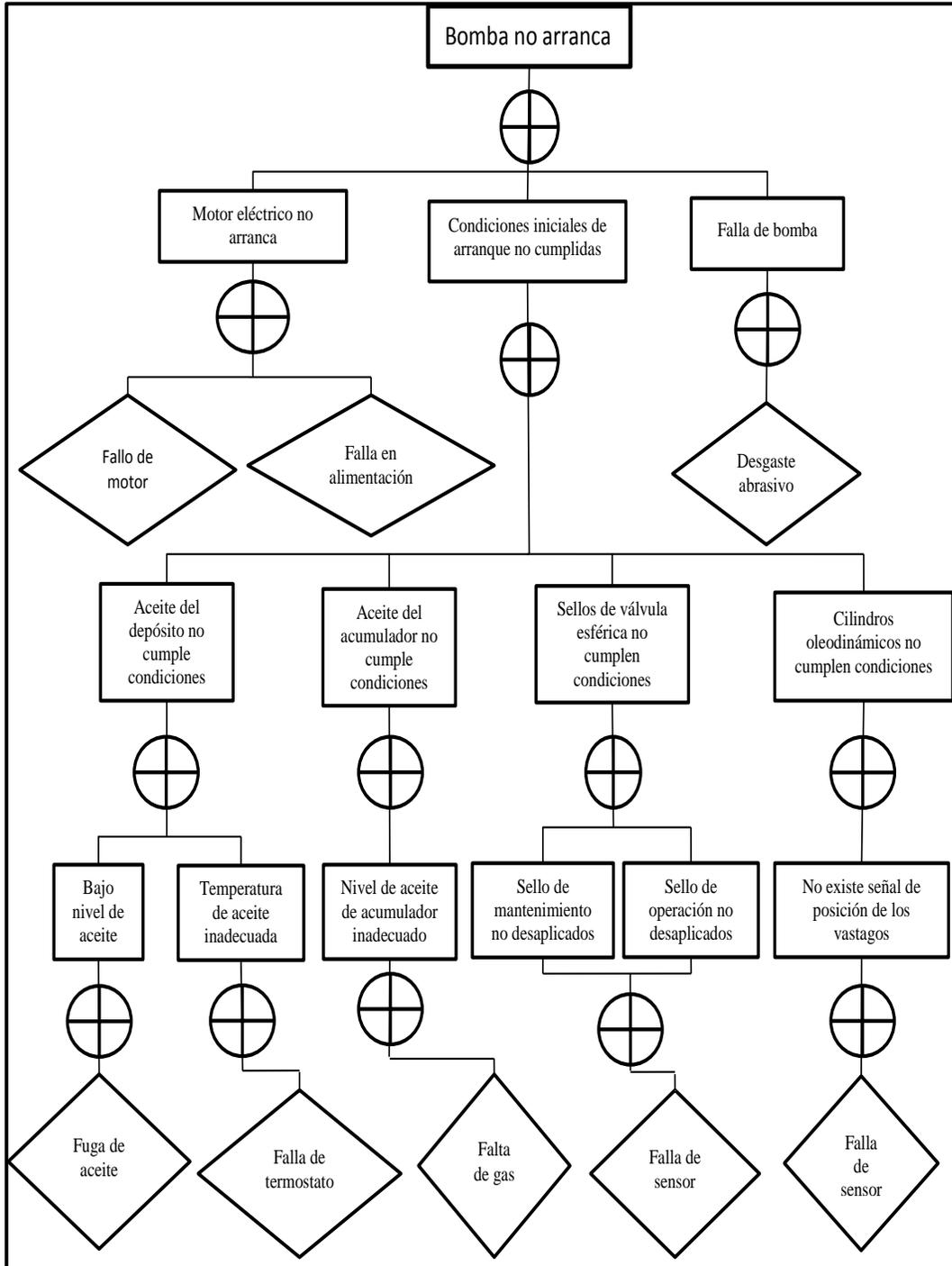
La figura 84 detalla los elementos que se accionan y verifican desde la orden de paro del equipo oleodinámico, empezando desde el cierre de los inyectores hasta el paro de la bomba.

Las acciones son supervisadas por el PLC maestro, quien controla todas las funciones de protección del equipo, verificando las señales de entrada y actuando los servomotores respectivos.

4.3.4. Análisis de fallas por medio de árboles de falla

Después de analizar la forma en que opera la unidad oleodinámica de presión desde su secuencia de arranque, hasta la secuencia de paro, se analizarán las fallas que se pueden presentar en el equipo oleodinámico.

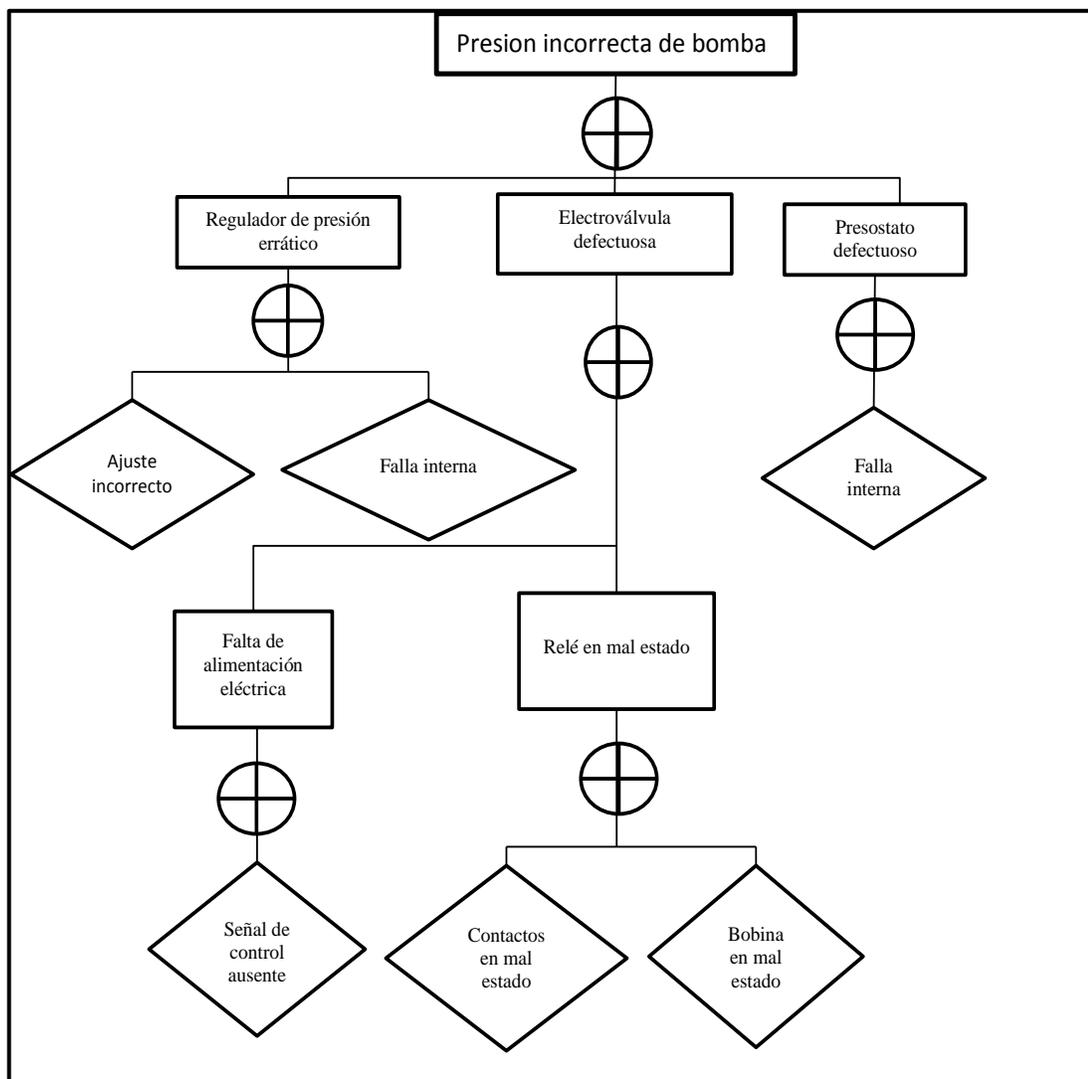
Figura 85. **Árbol de falla para arranque de bomba**



Fuente: elaboración propia.

El análisis se inició con el arranque de la bomba, pues esta es la fuente de potencia que suministra el caudal necesario para el funcionamiento de los cilindros oleodinámicos. Se hizo énfasis en las condiciones iniciales de arranque, pues es aquí donde se presentan las mayores fallas.

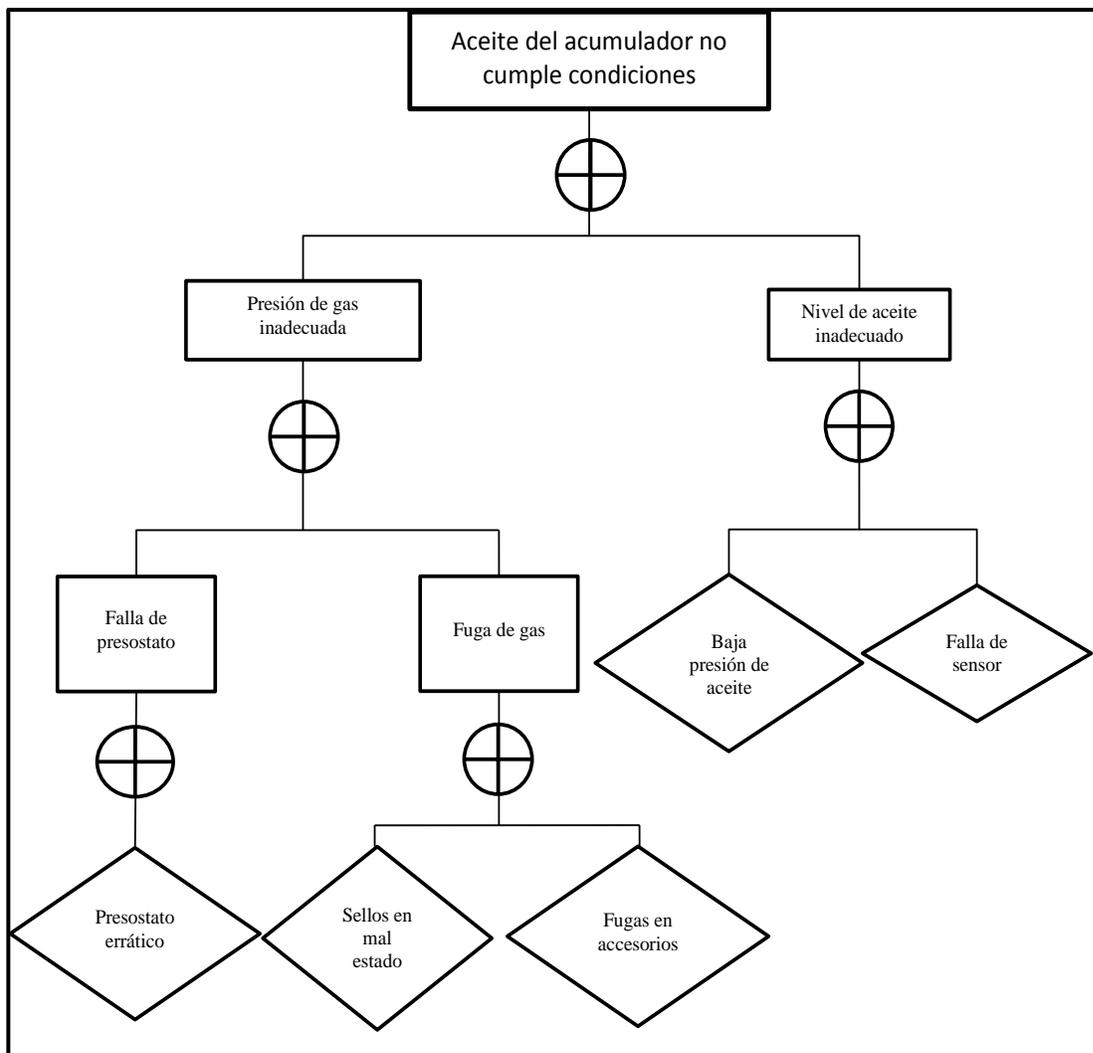
Figura 86. **Árbol de falla para presión incorrecta de bomba**



Fuente: elaboración propia.

La falla por presión incorrecta de la bomba es otra de las fallas más frecuentes en la unidad oleodinámica de presión. La regulación de la presión de la bomba de desplazamiento positivo requiere el uso de una electroválvula para mantener la presión dentro del rango de operación adecuado para alimentar a todos los circuitos oleodinámicos.

Figura 87. **Árbol de falla para el aceite del acumulador**



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el orden de frecuencia de probabilidad de fallas, se presenta cuando el aceite del acumulador neumático no cumple las condiciones operativas. Las fugas de gas producen la mayor parte de los problemas, en la mayor parte por fugas en accesorios. No se pueden generalizar las fallas, pues la parte electrónica también es fuente de problemas, principalmente, en los sensores, que proporcionan falsas lecturas, fácilmente detectadas por las señales erráticas que ellos envían al control lógico programable maestro.

4.3.5. Análisis por medio de modo y efecto de falla

Aquí se describen algunas fallas presentadas en el sistema oleodinámico de regulación. Lo más importante de este análisis es identificar las causas de las fallas, determinar los controles y proponer acciones o recomendaciones para que en su fase final se evalúen los cambios obtenidos después de implementar las oportunidades de mejora. Esta herramienta permite evaluar la calidad del mantenimiento efectuado, la efectividad de los controles y la precisión de las soluciones aportadas, juntamente con las responsabilidades y el compromiso por mejorar continuamente.

En la siguiente tabla se presenta un análisis, donde se puede observar que los índices de prioridad de riesgo se reducen notablemente al implementar las acciones recomendadas, como análisis periódico de aceite, prueba rutinaria de válvulas, instalación de equipos de mejor calidad, revisiones periódicas de los componentes, optimización de la limpieza y capacitación del personal de mantenimiento.

Tabla XII. **Análisis del modo y efecto de falla del sistema oleodinámico de regulación (primera parte)**

Sistema:		Oleodinámico de Regulación		Número del equipo: OR-2534		AMEF:		Diseño: X		AMEF No. : 1510		Fecha:				
				Modelo del equipo: OR-01-1535				Proceso:		Realizado por: Supervisor O&M		Seguimiento por: Jefe de O&M				
Parte	Componente	Modo de Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Situación Actual				Acciones Recomendadas	Responsable	Situación Actual					
					Acciones Actuales (Controles)	Gravedad	Ocurrencia	Detección			NPR	Acciones Adoptadas	Gravedad	Ocurrencia	Detección	NPR
Bloque de válvulas (línea principal)	Válvula de seguridad	Desgaste abrasivo	Alta/baja presión de aceite	Aceite contaminado	Limpia aceite	10	2	5	100	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20
		Fatiga del resorte		Desgaste	Cambiar válvula	10	2	9	180	Pruebas de apertura/cierre	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20
	Presostato	Mal funcionamiento	Señal de incorrecta de baja o alta presión de aceite	Celula de medicion defectuosa	Cambiar presostato	10	2	8	160	Instalar presostato de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20
				Cortocircuito en la salida	Cambiar presostato	10	3	8	240		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	3	30
Válvula manual selectora de filtro de retorno	Filtro	Obstrucción	Baja presión	Suciedad en el aceite	Cambiar filtro	8	3	3	72	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	8	2	2	32
	Válvula antirretorno	Fatiga del resorte	Falta de estanqueidad	Desgaste	Cambiar válvula	2	2	9	36	Instalar válvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	2	1	9	18
Acumulador neumático	Sensor de nivel de aceite	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Hardware dañado	Cambiar sensor	9	3	9	243	Instalar sensor de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	8	72
				Software dañado	Cambiar sensor	9	2	8	144		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	8	72
				Cursor atorado	Cambiar sensor	9	1	8	72		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	8	72
	Sellos	Fluencia	Falta de estanqueidad	Mal montaje	Cambiar sello	7	5	2	70	Capacitar al personal	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	7	2	1	14
	Accesorios	Relajación	Falta de estanqueidad	Deformación	Torquear accesorios	5	6	1	30	Revisiones periódicas	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	5	1	1	5
Deposito	Sensor de nivel de aceite	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Software dañado	Cambiar sensor	9	3	5	135	Instalar sensor de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	2	36
				Transmisor defectuoso	Cambiar transmisor	9	4	5	180		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	2	36
				Cortocircuito en la salida	Cambiar sensor	9	3	5	135		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	2	36
				Sonda contaminada	Limpia sonda	9	5	5	225		Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	2
	Sensor de temperatura de aceite	Operación errática	Señal incorrecta de temperatura de aceite	Apertura del alambre de platino	Cambiar sensor	9	3	6	162	Instalar sensor de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	3	54
			Falla de corriente de excitación	Verificar cableado y fuente	9	2	6	108	Revisiones periódicas	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	2	18	
Válvula manual selectora de filtro de presión	Filtro	Obstrucción	Baja presión	Suciedad	Limpia o cambiar filtro	4	4	2	32	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	4	2	1	8
	Válvula antirretorno	Fatiga del resorte	Falta de estanqueidad	Desgaste	Cambiar válvula	4	2	8	64	Instalar válvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	4	1	7	28
Bloque de válvulas (línea de presión)	Electroválvula 2/2 vías	Mal funcionamiento	No abre o cierra	Bobina en mal estado	Cambiar válvula	10	5	6	300	Instalar válvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
				Mecanismo de retorno en mal estado	Cambiar válvula	10	5	6	300		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
				Velocidad irregular del actuador	Cambiar válvula	10	5	6	300		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
	Presostato	Mal funcionamiento	Señal de incorrecta de baja o alta presión de aceite	Celula de medicion defectuosa	Cambiar presostato	10	3	8	240	Instalar presostato de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	3	30
				Cortocircuito en la salida	Cambiar presostato	10	2	8	160		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	3	30
	Válvula de seguridad	Desgaste abrasivo	Alta/baja presión de aceite	Aceite contaminado	Limpia aceite	10	3	2	60	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
Desgaste					Cambiar válvula	10	2	9	180	Pruebas de apertura/cierre	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Análisis del modo y efecto de falla del sistema oleodinámico de regulación (segunda parte)**

AMEF																
Sistema: Oleodinámico de Regulación			Número del equipo: OR-2534		AMEF:	Diseño: X		AMEF No.: 1510		Fecha:						
			Modelo del equipo: OR-01-1535			Proceso:		Realizado por: Supervisor O&M		Seguimiento por: Jefe de O&M						
Parte	Componente	Modo de Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Situación Actual				Acciones Recomendadas	Responsable	Situación Actual					
					Acciones Actuales (Controles)	Gravedad	Ocurrencia	Delección			NPR	Acciones Adoptadas	Gravedad	Ocurrencia	Delección	NPR
Calentador de aceite	Resistencia eléctrica	Operación errática	No calienta	Corte de alambre resistivo	Cambiar resistencia	4	2	9	72	Instalar resistencia de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	4	1	8	32
	Termostato	Operación errática	Señal incorrecta de temperatura	Falla del dispositivo	Cambiar termostato	3	2	8	48	Instalar termostato de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	3	1	6	18
				Suciedad	Limpia termostato	4	2	9	72	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	4	1	4	16
Enfriador de aceite	Intercambiador de calor de tubos	Desgaste abrasivo de los tubos	Contaminación del aceite	Agua mal tratada	Mejorar la calidad del agua	10	3	3	90	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	1	20
	Valvula termostática	Operación errática	Alta temperatura de aceite	Falla de valvula	Cambiar valvula	9	2	8	144	Instalar valvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	2	18
				Suciedad	Limpia valvula	7	5	9	315	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	7	2	2	28
Bomba	Acoplamiento mecánico	Fractura	Vibración	Fatiga	Cambiar acoplamiento	10	2	8	160	Revisión periódicas	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20
	Filtro de aspiración	Obstrucción	Baja presión	Suciedad	Cambiar filtro	3	4	5	60	Análisis de aceite periódico	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	3	2	2	12
	Motor eléctrico	No hay tensión en bornes	No arranca	Falta de alimentación de red	Verificar fuente	7	3	7	147	Revisión periódicas	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	7	2	2	28
		Falla en el estator	Arranque irregular	Cortocircuito entre espiras	Rebobinar	9	2	8	144	Análisis periódico de consumos	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	1	4	36
		Par excesivo	Funcionamiento a baja velocidad	Carga excesiva	Reducir carga	8	7	3	168	Análisis periódico de consumos	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	8	3	1	24
	Valvula antirretorno	Fatiga del resorte	Falta de estanqueidad	Desgaste	Cambiar valvula	3	2	9	54	Instalar valvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	3	1	3	9
Bloque de valvulas	Electrovalvula 4/2 vias	Mal funcionamiento	No abre o cierra	Falta de alimentación	Verificar fuente	10	2	5	100	Instalar valvula de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	1	2	20
				Bobina en mal estado	Cambiar valvula	10	5	6	300		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
				Mecanismo de retorno en mal estado	Cambiar valvula	10	5	6	300		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
				Velocidad irregular del actuador	Cambiar valvula	10	5	6	300		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	10	2	2	40
Cilindros oleodinámicos	Sensores de posición	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Hardware dañado	Cambiar sensor	9	3	9	243	Instalar sensor de mejor calidad	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	3	54
				Software dañado	Cambiar sensor	9	2	8	144		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	3	54
				Cursor atorado	Liberar cursor	9	2	8	144		Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	9	2	3	54
	Sellos	Desgaste	Fuga	Mal montaje	Mejorar el montaje	5	6	2	60	Capacitar al personal	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	5	3	1	15
				Temperatura excesiva	Reducir carga	5	4	4	80	Capacitar al personal	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	5	2	2	20
				Aire en el aceite	Eliminar filtración de aire	5	4	4	80	Mejorar el sellado del sistema	Jefe de O&M	Las acciones recomendadas	5	2	2	20

Fuente: elaboración propia.

En esta tabla se puede apreciar que, al implementar las acciones recomendadas, la gravedad se mantiene constante, pero disminuyen las ocurrencias y se mejoran los métodos de detección. Esta es una herramienta de mejora continua, pues existen muchas fallas esporádicas y se desconocen los controles respectivos, por lo que se debe actualizar constantemente y evaluar su eficacia para tener un mejor rendimiento y control del mantenimiento.

4.3.6. Análisis de Pareto

En la tabla XIV se muestra el análisis de Pareto aplicado para el sistema oleodinámico de regulación y su regulación respectiva, en el cual se describen, de forma detallada, las fallas más frecuentes en el sistema o equipo oleodinámico.

Tabla XIII. Análisis de Pareto para el sistema oleodinámico

Descripción de falla							
Item	Parte	Componente	Modo de Falla	Efecto de la Falla	Causa de la Falla	Frecuencia	% Frecuencia
A	Bloque de valvulas (linea principal)	Valvula de seguridad	Desgaste abrasivo	Alta/baja presion de aceite	Aceite contaminado	8	5%
B			Fatiga del resorte		Desgaste	2	1%
C		Presostato	Mal funcionamiento	Señal de incorrecta de baja o alta presion de aceite	Celula de medicion defectuosa	3	2%
D					Cortocircuito en la salida	2	1%
E	Valvula manual selectora de filtro	Filtro	Obstruccion	Baja presion	Suciedad en el aceite	10	6%
F		Valvula antirretorno	Fatiga del resorte	Falta de estanqueidad	Desgaste	2	1%
G	Acumulador neumatico	Sensor de nivel de aceite	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Hardware dañado	3	2%
H					Software dañado	2	1%
I					Cursor atorado	2	1%
J		Sellos	Fluencia	Falta de estanqueidad	Mal montaje	4	2%
K		Accesorios	Relajacion	Falta de estanqueidad	Deformacion	3	2%
L	Deposito	Sensor de nivel de aceite	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Software dañado	3	2%
M					Transmisor defectuoso	5	3%
N					Cortocircuito en la salida	2	1%
Ñ			Sonda contaminada	6	3%		
O		Sensor de temperatura de aceite	Operación erratica	Señal incorrecta de temperatura de aceite	Apertura del alambre de platino	4	2%
P				Falla de corriente de excitación	3	2%	
Q	Bloque de valvulas (linea de presion)	Electrovalvula 2/2 vias	Mal funcionamiento	No abre o cierra	Bobina en mal estado	4	2%
R					Mecanismo de retorno en mal estado	3	2%
S					Velocidad irregular del actuador	7	4%
T	Calentador de aceite	Resistencia electrica	Operación erratica	No calienta	Corte de alambre resistivo	2	1%
U		Termostato	Operación erratica	Señal incorrecta de temperatura	Falla del dispositivo	3	2%
V					Suciedad	10	6%
W	Enfriador de aceite	Intercambiador de calor de tubos	Desgaste abrasivo de los tubos	Contaminacion del aceite	Agua mal tratada	9	5%
X		Valvula termostatica	Operación erratica	Alta temperatura de aceite	Falla de valvula	4	2%
Y					Suciedad	7	4%
Z	Bomba	Acoplamiento mecanico	Fractura	Vibracion	Fatiga	3	2%
AA		Filtro de aspiracion	Obstruccion	Baja presion	Suciedad	8	5%
BB		Motor electrico	No hay tension en bornes	No arranca	Falta de alimentacion de red	4	2%
CC			Falla en el estator	Arranque irregular	Cortocircuito entre espiras	2	1%
DD			Par excesivo	Funcionamiento a baja velocidad	Carga excesiva	6	3%
EE		Valvula antirretorno	Fatiga del resorte	Falta de estanqueidad	Desgaste	7	4%
FF		Cilindros oleodinamicos	Sensores de posicion	Mal funcionamiento	Señal incorrecta de nivel de aceite	Hardware dañado	5
GG	Software dañado					4	2%
HH	Cursor atorado					3	2%
II			Mal montaje	5	3%		
JJ	Sellos		Desgaste	Fuga	Temperatura excesiva	4	2%
KK				Aire en el aceite	12	7%	
TOTAL						176	100%

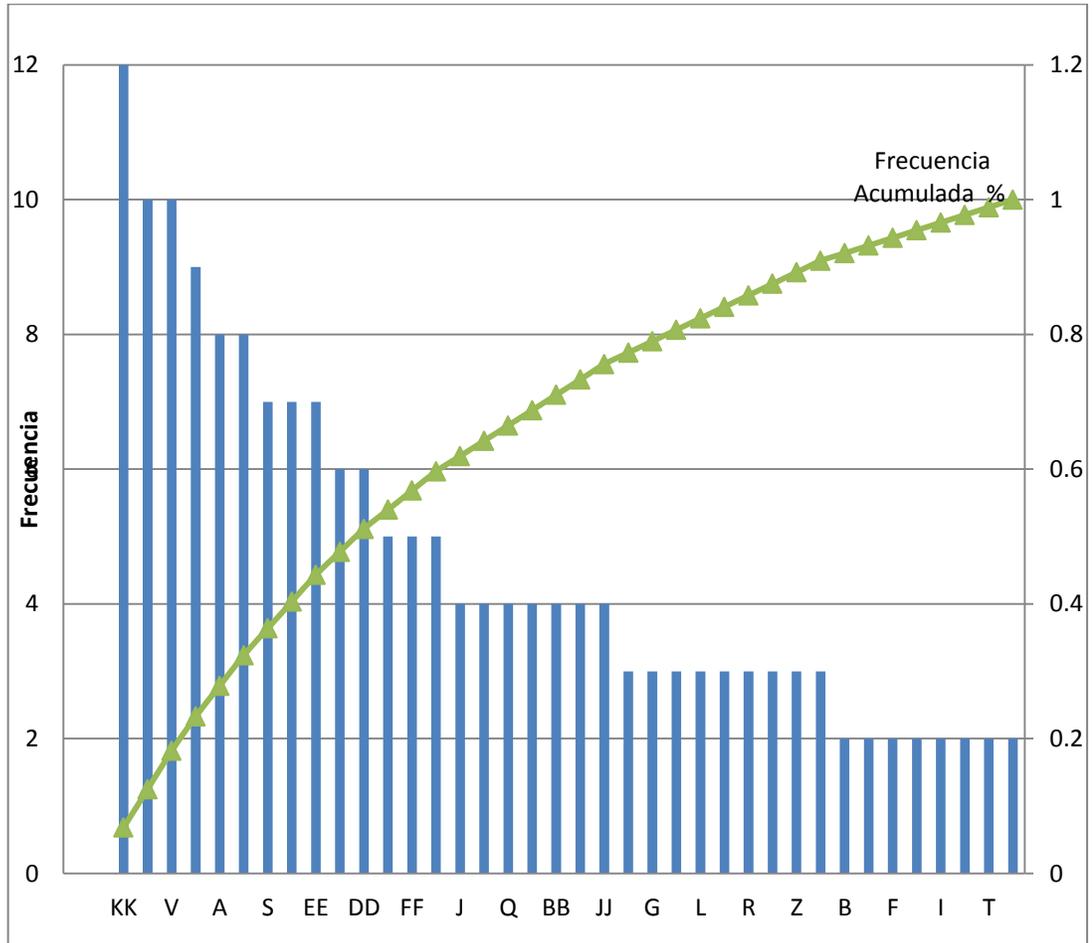
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis de la gráfica de Pareto**

Ítem	Frecuencia	% Frecuencia	% Frecuencia Acumulada
	12	7 %	7 %
E	10	6 %	13 %
V	10	6 %	18 %
W	9	5 %	23 %
A	8	5 %	28 %
AA	8	5 %	32 %
S	7	4 %	36 %
Y	7	4 %	40 %
EE	7	4 %	44 %
Ñ	6	3 %	48 %
DD	6	3 %	51 %
M	5	3 %	54 %
FF	5	3 %	57 %
II	5	3 %	60 %
J	4	2 %	62 %
O	4	2 %	64 %
Q	4	2 %	66 %
X	4	2 %	69 %
BB	4	2 %	71 %
GG	4	2 %	73 %
JJ	4	2 %	76 %
C	3	2 %	77 %
G	3	2 %	79 %
K	3	2 %	81 %
L	3	2 %	82 %
P	3	2 %	84 %
R	3	2 %	86 %
U	3	2 %	88 %
Z	3	2 %	89 %
HH	3	2 %	91 %
B	2	1 %	92 %
D	2	1 %	93 %
F	2	1 %	94 %
H	2	1 %	95 %
I	2	1 %	97 %
N	2	1 %	98 %
T	2	1 %	99 %
CC	2	1 %	100 %
	176	100 %	

Fuente: elaboración propia.

Figura 88. Gráfica de Pareto



Fuente: elaboración propia.

Según la gráfica expuesta, donde se realizó el análisis de Pareto se concluye lo siguiente, de acuerdo con los siguientes valores:

- A= 15 %, alta criticidad
- B=25 %, mediana criticidad
- C= Porcentaje restante, baja criticidad
- Total de fallas= 38

- La zona de alta criticidad pertenecen a seis fallas; KK, aire en el aceite de sellos, EE, falta de estanqueidad en válvula antirretorno, V, suciedad en termostato, W, agua mal tratada en intercambiador de calor, A, aceite contaminado en válvula de seguridad, y AA, suciedad en filtro de aspiración.
- La zona de mediana criticidad incluye diez fallas: S, carrete en mal estado en electroválvula 2/2 vías, Y, suciedad en válvula termostática, EE, desgaste de válvula antirretorno, Ñ, sonda contaminada de sensor de nivel, DD, carga excesiva en motor eléctrico, M, transmisor defectuoso de sensor de nivel, FF, hardware dañado en sensor de posición, II, mal montaje de sellos en cilindros, J, mal montaje de sellos en acumulador, O, apertura de alambre de platino en sensor de temperatura de aceite.
- El 60 % de fallas restantes corresponden a las fallas de baja criticidad.

Las mayores acciones preventivas incluirán la eliminación de fugas, minimización del desgaste de los equipos por medio de análisis físico-químico del aceite y su posterior tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua de enfriamiento.

4.3.7. Mantenimiento del equipo oleodinámico

Utilizando la metodología del mantenimiento productivo total, se logran reducir las acciones de mantenimiento correctivo. Las oportunidades de mejora, en su mayoría, son detectadas por el mantenimiento predictivo y preventivo. Gran parte de las actividades son llevadas a cabo por personal de operación, quienes conocen mejor los equipos.

La metodología del mantenimiento productivo total junto con el proceso de mantenimiento, desarrollan prácticas de mantenimiento eficiente, en un ambiente de colaboración, donde la información es vista como un valioso activo puesto en manos de todos, para que cada uno aporte y enriquezca las bases de datos, las cuales son insumos para tomar decisiones y definir las estrategias de mantenimiento corporativo.

4.3.8. Mantenimiento predictivo del equipo oleodinámico

El mantenimiento predictivo se utiliza para conocer las condiciones de operación de los equipos por medio de métodos no invasivos. Es parte del mantenimiento autónomo, llevado a cabo por personal de operaciones. El seguimiento del análisis de los resultados es parte del proceso de mantenimiento.

Tabla XV. Programa de mantenimiento predictivo del equipo oleodinámico

Componente	Periodo	Acción
Aceite	6 meses	Análisis fisicoquímico
Bomba	Semanal	Medir vibraciones
	Semanal	Medir temperatura de operación
Motor eléctrico	Semanal	Medir consumo de energía
	Semanal	Medir vibraciones
	Semanal	Medir temperatura de operación
	Semanal	Termografía de conexiones eléctricas
Intercambiador de calor	Semanal	Análisis de agua de enfriamiento

Fuente: elaboración propia.

En esta parte se permite extender o acortar los periodos del mantenimiento preventivo, tomando acciones proactivas de mantenimiento.

4.3.9. Mantenimiento preventivo del equipo oleodinámico

El Programa de mantenimiento preventivo del equipo oleodinámico se estructuró en tres elementos, el componente, el periodo y la acción que se tomará, por ejemplo, los filtros de presión y retorno en un lapso de tres meses y la acción que se toma es limpieza, asimismo el acumulador se revisará en seis meses, verificando su presión de gas. En la siguiente tabla se muestra detalladamente dicho proceso.

Tabla XVI. Programa de mantenimiento preventivo del equipo oleodinámico

Componente	Periodo	Acción
Filtros de presión y retorno	3 meses	Limpieza
Acumulador	6 meses	Verificar presión de gas
Filtro de aspiración	12 meses	Limpieza
Cierre rápido	6 meses	Prueba de funcionamiento
Tuberías flexibles	12 meses	Revisión de estado
	12 años	Sustitución
Aceite	Diario	Verificar nivel
		Verificar temperatura
		Verificar presión
	5 años	Sustitución
Inyectores	12 meses	Revisión de desgaste
Cilindros oleodinámicos	6 meses	Verificar tiempo de cierre
	6 meses	Verificar presión de trabajo
	Diario	Comprobación de fugas
Tornillería	6 meses	Verificar par de apriete
Bomba	6 meses	Verificar acoplamiento
Borneras y conexiones eléctricas	6 meses	Verificar par de apriete

Fuente: elaboración propia.

El mantenimiento preventivo es compartido por el personal de operación y mantenimiento. El objetivo es anticiparse a las fallas por medio de verificaciones rutinarias, según programas establecidos.

4.3.10. Mantenimiento correctivo del equipo oleodinámico

En el programa de mantenimiento correctivo, se presenta el problema, la causa del mismo y las acciones se aplicarán. Por ejemplo, cuando la bomba no bombea, la causa es que la succión de la bomba está obstruida o tapada, la acción que se debe tomar es verificar el tamaño de la línea de succión, verificar que el tamaño del filtro de succión sea el adecuado, remover y limpiar o reemplazar el filtro de succión. Este tipo de problemas están detallados en la siguiente tabla.

Tabla XVII. Programa de mantenimiento correctivo del equipo oleodinámico

Problema	Causa	Acción
La bomba no bombea.	Succión de la bomba obstruida o tapada	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verifique el tamaño de la línea de succión. 2. Verifique que el tamaño del filtro de succión sea el adecuado. 3. Remueva, limpie o reemplace el filtro de succión.
	Entrada de aire en la succión.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Repare la tubería de la succión. 2. Verifique que el drenaje de la bomba tenga la posición correcta. 3. Purgue o rellene la línea de la succión.
La bomba no levanta presión.	Engranaje trabado en la bomba.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desensamble la bomba y mire si tiene suciedad. 2. Limpie el sistema y rellene con aceite limpio.

Fuente: elaboración propia.

Continuación de tabla XVIII.

Problema	Causa	Acción
Válvula de alivio: Baja presión o ausencia de ella.	Contaminantes que mantienen la válvula parcialmente abierta.	1. Desensamble la válvula e inspeccione si hay mugre u otros contaminantes. 2. Limpie el asiento y el carrete. 3. Drene y limpie el sistema. Rellene con aceite recomendado y filtrado.
	Asiento picado o dañado.	Reemplace las piezas dañadas.
	Resorte roto.	Reemplace el resorte si es necesario.
	Carrete de válvula escoriado.	Remueva y reemplace.
Válvula proporcional. No sube la presión.	Carrete atascado.	Reemplace la válvula completa y verifique la limpieza del aceite.
	Desgaste excesivo del carrete.	Desensamble y verifique los empaques y cambie los que estén en mal estado.
	Amplificador desgastado, ganancia muy baja	Reemplace el amplificador.
No hay flujo a través de la válvula antirretorno.	Resorte roto.	Desensamble y reemplace el resorte o la válvula.
	Válvula instalada al revés.	1. Invierta las conexiones. 2. Chequee si el indicador de dirección está correcto.
El cilindro se mueve por sí solo.	Fuga en los sellos del pistón.	Desensamble y cambie los sellos.
	Fugas en el control direccional.	Desensamblar válvula direccional y revisar el carrete, resortes y cuerpo.
El cilindro no mueve la carga cuando se actúa la válvula.	Presión muy baja.	Recalcule el cilindro en conjunto con la carga.
	Contaminación.	1. Verifique si hay excesiva temperatura. 2. Remueva y reemplace con sellos para alta temperatura.
El cilindro opera erráticamente.	Aireación del sistema.	1. Desensamble y limpie. 2. Verifique si la presión piloto es muy baja. 3. Chequee si hay aire en el sistema. 4. Verifique si hay contaminación y desgaste

Fuente: elaboración propia.

Estas son algunas de las acciones tomadas en mantenimiento correctivo. Se puede observar que la mayor fuente de causas de fallas es la contaminación del aceite, la instalación inadecuada, el uso de partes no resistentes y el ajuste incorrecto de los equipos tanto de protección, como de regulación.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de la oleodinámica industrial para el sistema de regulación de una turbina Pelton radica en las servoválvulas electrohidráulicas que, junto al regulador de velocidad electrónico, logran mover suavemente las agujas de los inyectores, para mantener constantes las revoluciones del eje de la turbina y a la vez la frecuencia del generador, con aceleraciones y velocidades elevadas de los actuadores oleodinámicos por medio de la regulación del caudal de aceite. El alcance de la oleodinámica industrial, es delimitado por las disciplinas de la mecánica, electricidad, electrónica y sistemas de control basados en microprocesadores, las cuales, de manera integral logran operar el sistema en conjunto y de manera autónoma, confiable y flexible.
2. La unidad oleodinámica de presión del sistema oleodinámico de regulación de la turbina Pelton es un circuito complejo, pues está compuesto de ocho circuitos simples, debido a que involucra ocho líneas de presión, cada una con su respectivo actuador oleodinámico. El análisis oleodinámico por segmentos fue necesario para representar dicho circuito complejo. Cada circuito tiene sus particularidades en secuencias, límites de operación, retardos y protecciones. Se pudo apreciar que cada circuito es un sistema de control en lazo cerrado, caracterizado por adquirir retroalimentación constante de la variable controlada, como la velocidad de la turbina o el desplazamiento de los cilindros oleodinámicos, formando así, sistemas automáticos de control.

3. La operación del sistema de sello de mantenimiento de la válvula de guarda se acciona manualmente, pero con el permisivo de la posición de la válvula de guarda para la alimentación de agua. De la misma manera sucede con el sello de operación, pero se opera eléctricamente. Fueron diseñados de esta manera para que los actuadores oleodinámicos operaran de forma sistemática y segura, según la posición de la válvula de guarda, pues la aplicación de los sellos de mantenimiento y de operación, no pueden ser aplicados sin tener los permisivos necesarios de la válvula principal. Esta válvula es esencial en la central hidroeléctrica, por tal razón tiene protecciones redundantes para su operación segura y confiable.

4. Las fallas más comunes del sistema oleodinámico de regulación fueron analizadas por medio de diferentes herramientas, las que permitieron concluir que la contaminación del aceite es la mayor fuente de averías en los equipos. Seguido por fallas electrónicas, tanto en los dispositivos de medición, como en los de control. En menor medida las fallas se deben a un montaje incorrecto, y también por ajustes inadecuados de la instrumentación en la etapa de comisionamiento.

RECOMENDACIONES

1. Para optimizar el funcionamiento de las servoválvulas electrohidráulicas y debido a que la unidad oleodinámica utiliza aceite ISO VG 46, se deben ajustar los controladores de temperatura del aceite dentro del rango de 40 a 45°C, para mantener el aceite dentro de los límites de viscosidad de 41.4 a 50.6 cSt. El sistema oleodinámico de regulación de la turbina Pelton involucra a la mecánica y a otras disciplinas para el monitoreo y control de las diferentes variables, para ello, utiliza, principalmente, dispositivos electrónicos. Por esta razón, es necesario adquirir conocimientos afines y a la vez actualizados, pues la mayor parte de centrales eléctricas tienden a usar tecnología de vanguardia, la cual involucra cada vez más, sistemas de control automático.
2. Para obtener un mejor control del mantenimiento predictivo del sistema oleodinámico de regulación de la turbina Pelton, es necesario instalar tomas de presión en cada uno de los circuitos, de preferencia antes de los actuadores oleodinámicos y después de ellos, para llevar un registro de los diferenciales de presión. De esta forma se evitan los mantenimientos correctivos. Todo análisis de sistemas oleodinámicos empieza por el circuito oleodinámico, principalmente los planos. Por ello, se le debe conferir importancia capital a la interpretación de la simbología y nomenclatura oleodinámica de la mayor cantidad de normas posible, pues en Guatemala se utilizan diferentes sistemas de medida, donde cada uno tiene sus especificaciones respectivas. De igual manera las unidades de medida son importantes en relación a su equivalencia entre uno y otro sistema.

3. Debido a la importancia de los sellos de mantenimiento y de operación en la válvula de guarda, es necesario implementar un sistema de mantenimiento a cada parte. Un aspecto fundamental es tratar adecuadamente el agua de alimentación de los sellos, mejorando el sistema de filtrado, para evitar la obstrucción de las conducciones y demás accesorios. Se deben cambiar los filtros cuando se detecte alto diferencial de presión y verificar el ajuste de la instrumentación periódicamente. También se deben llevar registros de las presiones en el carrete aguas arriba y aguas abajo de la válvula de guarda para comprobar la estanqueidad de los sellos de mantenimiento y de operación.

4. Según el análisis de fallas del sistema oleodinámico de regulación, se debe implementar de manera concienzuda, un sistema de mantenimiento predictivo para el aceite, por medio de análisis físico químico y pruebas de estabilidad del aceite. Se procurará que la extracción de muestras de aceite sea representativa. Para ello, se deben tomar mientras están operando, en un mismo punto, drenando adecuadamente antes de extraer la muestra y evitar la contaminación de las mismas. Para el agua de enfriamiento se debe utilizar agua tratada, como mínimo, libre de alcalinidad y ausente de material biológico y de sólidos en suspensión.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANDER-EGG, Ezequiel. *Métodos y técnicas de investigación social*. Argentina: Rio de Plata, 2003. 175 p.
2. ARROYO, Millan. *Metodología de la investigación social*. Madrid: Síntesis, 2014. 352 p.
3. CAZAU Pablo. *Introducción a la investigación en ciencias sociales*. Argentina: Alianza, 2006. 125 p.
4. CEA D'Ancona, María. (2003) *Estrategias y técnicas de investigación social*. Chile: Alianza, 2003. 125 p.
5. CEBALLOS, Osbaldo. *Manual Vickers de Oleohidráulica Industrial*. 2ª ed. España: Blume S.A., 1984. 300 p.
6. CÓRDOBA, García. *La tesis y el trabajo de tesis*. Perú: Limusa, 2004. 90 p.
7. DELGADO, Manuel. *Métodos y técnicas cualitativas investigación en ciencias sociales*. España: Síntesis, 2004. 672 p.
8. DENZIN, Norman. *Manual de investigación cualitativa*. Colombia: Gedisa, 2012. 376 p.
9. ECO, Umberto. *Cómo se hace una tesis*. Chile: Gedisa, 2009. 240 p.

10. GIBBS, Graham. *El análisis de datos cualitativos en investigación*. Colombia: Morata, 2012. 200 p.
11. HERNÁNDEZ, Roberto. *Metodología de la investigación*. Ciudad Juárez: McGraw-Hill, 2006. 569 p.
12. MATAIX, Claudio. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. 2ª ed. España: Del Castillo, 1986. 346 p.
13. MATAIX, Claudio. *Turbo máquinas Hidráulicas*. 2ª ed. Madrid: ICAI, 1975. 375 p.
14. MORIN, Edgar. *Introducción al pensamiento complejo*. Costa Rica: Gedisa, 2005. 176 p.
15. MÜLLER, Martha. *Guía Para Elaboración de Tesis y Consultorio Gramatical*. Costa Rica: Universitaria, 2007. 136 p.
16. PARR, Andrew. *Hydraulics and Neumatics: a technicians's and engineer's guide*. 2ª ed. Gran Bretaña: Elsevier Butterworth Heinemann, 1998. 244 p.
17. RUIZ, José. *Metodología de la investigación cualitativa*. Madrid: Universidad de Deusto, 2012. 344 p.
18. VALLES, Miguel. *Técnicas cualitativas de investigación social*. Venezuela: Síntesis, 2014. 432 p.

19. VICMEX. *Manual de Hidráulica Industrial*. México: Vicmex, 2003. 300 p.
20. VICKERS - Eaton Fluid Power Training. *Manual de Oleohidráulica Móvil*. México: Blume, 2003. 189 p.
21. VICKERS - Eaton Fluid Power Training. *Manual de Oleohidráulica Industrial*. México: Blume, 2003. 178 p.
22. ZAPATA, Oscar. *Herramientas para elaborar tesis e investigaciones*. México: Pax, 2005. 280 p.

