



Diseño de un sistema de control electrohidráulico para operación de compuertas de salida en desarenador de la pequeña central hidroeléctrica Guanaquitas

Jorge Luís Buelvas Hernández

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia
2022

Diseño de un sistema de control electrohidráulico para operación de compuertas de salida en desarenador de la pequeña central hidroeléctrica Guanaquitas

Jorge Luís Buelvas Hernández

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico

Director (a):
Ingeniero, Iván David Patiño Arcila

Línea de Investigación:
Diseño electromecánico

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Medellín, Colombia

2022

(Dedicatoria o lema)

*“A mi madre quien
ha sido la fuente constante
de motivación, amor
y esperanza. Sin su
apoyo este logro
nunca hubiera sido posible”
María Hernández – en su memoria*

Agradecimientos

Inicialmente quiero agradecer a Dios, por darme la sabiduría que necesité para la obtención de este logro, por guiarme por el camino indicado y por llenarme cada día de maravillosas bendiciones.

A mi esposa Jessica Jiménez, por ser comprensiva y por darme tanto apoyo incondicional en el camino a la obtención de este logro.

A mis hijos Emiliano y Luciana Buevas, que se convirtieron en la motivación más grande para alcanzar este gran sueño.

A la empresa ISAGEN S.A. ESP. por haberme apoyado flexibilizando las jornadas laborales, con el fin de que este logro fuera posible. Agradecimiento especial a la ingeniera Luz María Gonzales.

A la universidad Antonio Nariño y el cuerpo de docentes de Ingeniería Electromecánica sede Medellín, por su compromiso y comprensión durante el proceso de formación de este gran logro.

Agradezco de forma especial a mi asesor Iván David Patiño por todo el apoyo brindado a lo largo de este proyecto, por compartir conmigo su conocimiento, sin su ayuda este trabajo no sería posible.

Resumen

En el presente proyecto se plantea la necesidad de diseñar el sistema de control electrohidráulico para facilitar la operación del cierre y apertura de las compuertas de salida del tanque desarenador en forma automática, ubicado en la captación de la Pequeña Central Hidroeléctrica Guanaquitas. Actualmente las compuertas son accionadas de forma manual por una persona. El sistema está conformado por un mecanismo de tornillo sin fin guiado con una caja reductora en cuyo interior se alojan engranajes organizados que finalmente se acoplan con un volante de tamaño considerable desde donde el operario realiza la maniobra.

El tanque desarenador y las compuertas son un sistema de eliminación de sólidos presentes en el agua proveniente del río Guadalupe, por lo tanto, su operación es necesaria para el proceso de generación de energía eléctrica. Actualmente el mecanismo existente para la apertura y cierre de las compuertas es muy lento, al accionar el volante el operario se ve sometido a esfuerzos físicos y posturales no apropiados que pueden ocasionar lesiones osteomusculares.

Con la propuesta de este diseño se pretende mejorar y acortar los tiempos de operación del proceso, como también incrementar la vida útil de los componentes mecánicos de la turbina, ya que, al tener un tiempo corto de operación una cantidad menor de sólidos ingresa al sistema. El diseño se inicia con un análisis en FluidSIM, posteriormente se elaborará el trazado de los circuitos eléctricos de potencia y control en AutoCAD, y finalmente se elaborará el programa de control para el accionamiento del sistema en el software TIA Portal V15.1. Lo cual permitirá un acercamiento muy real del sistema de control definido con base en los cálculos de diseño y los componentes necesarios.

Palabras claves: PCH, generación de energía, oleohidráulica, desarenador, automatización.

Abstract

This project raises the need to design the electrohydraulic control system to facilitate the operation of closing and opening the exit gates of the sandblasting tank automatically, located in the catchment of the Guanaquitas Small Hydroelectric Power Plant. Currently the gates are manually operated by a person. The system is made up of an endless screw mechanism guided by a gearbox inside which organized gears are housed that are finally coupled with a steering wheel of considerable size from where the operator performs the maneuver.

The sandblasting tank and the gates are a system of elimination of solids present in the water coming from the Guadalupe River, therefore, its operation is necessary for the process of generating electrical energy. Currently the existing mechanism for the opening and closing of the gates is very slow, when activating the steering wheel the operator is subjected to physical and inappropriate postulates that can cause musculoskeletal injuries.

With the proposal of this design it is intended to improve and shorten the operating times of the process, as well as increase the useful life of the mechanical components of the turbine, since, having a short operating time, a smaller amount of solids enters the system. The design begins with an analysis in FluidSIM, then the layout of the electrical circuits of power and control in AutoCAD will be elaborated, and finally the control program for the drive of the system will be elaborated in the TIA Portal V15.1 software. This will allow a very real approach to the defined control system based on the design calculations and the necessary components.

Keywords: PCH, power generation, oleohydraulic, sandblaster, automation.

Contenido

1. Introducción	17
2. Objetivos	19
2.1 Objetivo general	19
2.1 Objetivos específicos	19
3. Marco teórico	20
3.1 Marco de referencia	20
3.2 Marco de antecedentes	20
3.3 Definiciones y conceptos de una PCH.....	22
3.3.1 Pequeña central Hidroeléctrica (PCH)	22
3.3.2 Funcionamiento de una PCH.....	22
3.3.3 Clasificación de las PCH.....	23
3.4 Partes principales de una PCH.....	23
3.4.1 Captación	24
3.4.2 Sifón y canal de conducción	25
3.4.3 Tanque de carga.....	26
3.4.4 Tubería de presión.....	27
3.4.5 Casa de máquinas.....	27
3.4.6 Canal de descarga.....	28
3.4.7 Subestación eléctrica.....	29
3.5 Equipos y sistemas	30
3.5.1 Válvula de admisión tipo mariposa.....	30
3.5.2 Válvula By-pass.....	31
3.5.3 Unidad de potencia hidráulica (HPU)	32
3.5.4 Unidad de lubricación	33
3.5.5 Conjunto turbina	34
3.5.6 Generador	36
3.6 Estática de fluidos	36
3.6.1 Principio de Pascal	36
3.6.2 Fuerza hidrostática	37
3.6.3 Fuerza hidrostática en superficies planas sumergidas	38
3.7 Compuertas hidráulicas.....	40
3.7.1 Clasificación de las compuertas.....	41
3.7.2 Fuerzas que actúan en una compuerta de carga baja	42
3.7.3 Tipos de compuertas	45
3.7.4 Equipos de accionamiento y elementos asociados	48
3.7.5 Componentes de una unidad de potencia hidráulica.....	50
3.7.6 Procedimiento para calcular componentes oleohidráulicos	52
3.8 Conceptos de electricidad	57
3.8.1 Magnitudes eléctricas fundamentales	57
3.8.2 Circuitos eléctricos.....	58
3.8.3 Instalaciones eléctricas.....	58
3.9 Procedimiento para cálculos eléctricos.....	60
3.10 Automatización y control	64
3.10.1 Equipos para la automatización	66
4. Diseño metodológico	75
4.1 Fase 1. Determinación de los requerimientos para el diseño.	77

4.2	Fase 2. Definición de componentes y equipos.	78
4.3	Fase 3. Proyección de planos.....	79
4.4	Fase 4. Desarrollo del programa de automatización.	79
5.	Resultados y análisis.....	80
5.1	Cálculos de diseño de subsistemas oleohidráulico, eléctrico y de control.	82
5.1.1	Cálculos de la fuerza hidrostática.....	82
5.1.2	Cálculos de fuerza resultante requerida para levantar la compuerta	84
5.1.3	Cálculo del sistema oleohidráulico y condiciones de funcionamiento	87
5.1.4	Cálculos para circuitos eléctrico	91
5.1.5	Cálculos para circuito de control.....	97
5.2	Componentes oleohidráulicos, eléctricos y de control.....	99
5.3	Planos oleohidráulicos, eléctricos y de control.....	104
5.4	Desarrollo de software de automatización	105
6.	Conclusiones	106
7.	Bibliografía.....	107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Partes principales de una PCH.....	24
Figura 2. Canal de conducción PCH Guanaquitas.....	25
Figura 3. Tanque de carga PCH Guanaquitas.....	26
Figura 4. Tubería de presión PCH Guanaquitas.....	27
Figura 5. Edificación de casa de máquinas.....	28
Figura 6. Canal de descarga Guanaquitas.....	29
Figura 7. Subestación de generación 44kV.....	30
Figura 8. Válvula de admisión con contrapeso.....	31
Figura 9. Válvula By-pass.....	32
Figura 10. HPU unidad de potencia hidráulica.....	33
Figura 11. Unidad de lubricación.....	34
Figura 12. Conjunto turbina y rodete Francis.....	35
Figura 13. Prensa hidráulica de Pascal.....	37
Figura 14. Aplicación de la fuerza hidrostática en un área o superficie.....	38
Figura 15. Fuerza hidrostática en superficies planas.....	39
Figura 16. Compuerta de carga alta.....	41
Figura 17. Compuerta de carga baja a nivel de la columna de agua.....	42
Figura 18. Fuerzas que actúan en una compuerta de carga baja.....	43
Figura 19. Compuerta plana de rodillos.....	46
Figura 20. Compuerta radial.....	47
Figura 21. Compuerta plana deslizante.....	47
Figura 22. Mecanismo de accionamiento manual para compuertas.....	48
Figura 23. Accionamiento eléctrico para compuertas.....	49
Figura 24. Accionamiento electrohidráulico para compuertas.....	50
Figura 25. Representaciones físicas de un circuito eléctrico.....	58
Figura 26. Aspectos de la automatización.....	65
Figura 27. Controlador lógico programable S7 -1200 SIEMENS.....	67
Figura 28. Módulo de entradas digitales - SIEMENS.....	67
Figura 29. Módulo de salidas digitales – SIEMENS.....	68
Figura 30. Interruptor o final de carrera.....	69
Figura 31. Presostato - Telemecanique.....	69
Figura 32. Termostato analógico.....	70
Figura 33. Sensor inductivo digital.....	70
Figura 34. Motor eléctrico trifásico - SIEMENS.....	71
Figura 35. Cilindro hidráulico de doble efector.....	71
Figura 36. Contactor eléctrico – ABB.....	72
Figura 37. Relé electromecánico - Finder.....	72
Figura 38. Representación del lenguaje LADDER.....	73
Figura 39. Ejemplo lenguaje texto estructurado.....	74

Figura 40. <i>Ejemplo lenguaje diagramas de bloques de funciones</i>	74
Figura 41. <i>Ejemplo lenguaje esquema secuencial de funciones</i>	75
Figura 42. <i>Esquema metodológico</i>	76
Figura 43. <i>Dimensiones del tanque desarenador</i>	80
Figura 44. <i>Vista frontal y dimensiones compuerta de salida desarenador</i>	81
Figura 45. <i>Columna de agua para calcular la fuerza hidrostática</i>	83
Figura 46. <i>Diagrama de cuerpo libre para el análisis de fuerzas</i>	84

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Coeficiente de fricción típicos.....	45
Tabla 2. Fórmulas para calcular variables eléctricas	60
Tabla 3. Valores de referencia de potencia consumida por aparatos eléctricos	63
Tabla 4. Variables para calcular la fuerza hidrostática y centro de presión	77
Tabla 5. Variables para calcular la fuerza hidrostática	82
Tabla 6. Información técnica tablero =NE50+NE51	91
Tabla 7. Datos técnicos de motor eléctrico.....	92
Tabla 8. Cálculos de corriente de los elementos	95
Tabla 9. Clasificación de cargas	96
Tabla 10. Aforo de cargas componentes circuito de control	98
Tabla 11. Circuitos de control.....	99
Tabla 12. Componentes y elementos sistema oleohidráulico	100
Tabla 13. Componentes y elementos circuito eléctrico.....	101
Tabla 14. Componentes y elementos circuito de control.	102

1.Introducción

Guanaquitas es una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) a filo de agua, ubicada en el municipio de Santa Rosa (Antioquia), con una capacidad instalada de 11,5 MW de potencia, cuenta con un generador síncrono de 10 polos y una velocidad de giro de 720 RPM. El conjunto turbina está compuesto por un rodete Francis para un caudal turbinado de $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$ que se obtiene del Rio Guadalupe con un salto de 169,3 mca (metro de columna de agua), también está compuesta por un ducto de aspiración, el distribuidor, y demás componentes mecánicos para realizar el proceso de generación.

El cauce natural del rio es desviado en la zona de captación por medio de las rejas de aducción que encausan el agua al canal de conducción, que posteriormente llega al tanque desarenador, en este punto del proceso se separan del agua la arena y los sólidos en suspensión; desafortunadamente el tanque desarenador no realiza satisfactoriamente la separación, ya que se satura muy rápido de sólidos, ésta condición generada por el rio Guadalupe hace que se presenten altas concentraciones de partículas suspendidas en distintas masas de agua.

Cuando el tanque desarenador se satura, ingresan sólidos al interior de la turbina, causando desgastes abrasivos en los componentes mecánicos, anomalía que acortan la vida útil de estos componentes. Además, acarrea altos costos en el mantenimiento. Esta condición obliga al personal de operación a realizar un lavado constante de los tanques.

Al final del desarenador están ubicadas las compuertas de salida, cuya función es bloquear el desarenador para efectos de lavado y mantenimiento (retirar la arena acumulada). Las compuertas son de operación manual mediante un volante de tamaño considerable unido a una caja reductora, que finalmente acciona un mecanismo de tornillo sinfín que abre o cierra la compuerta. Cerrar o abrir completamente la compuerta toma cerca de 40 minutos, Por lo que ésta es una maniobra muy lenta, que no contribuye a un eficiente proceso en la generación de energía.

La operación manual de las compuertas somete al operario a esfuerzos físico y postular considerables, causando cansancio, y puede llegar a originar lesiones osteomusculares que se manifiestan mediante dolor, fatigas o molestias, que pueden desencadenar agotamientos o incluso condiciones de incapacidad en los operadores. Vale la pena

precisar que la compuerta que se manipula tiene una masa de 2 toneladas aproximadamente.

En el presente trabajo se diseñó un control electrohidráulico, automatizado con un controlador lógico programable para operar las compuertas de salida del tanque desarenador, encaminado en la mejora del proceso de limpieza y mantenimiento, en aras a reducir los tiempos de operación, logrando un mejor control de ingreso de sedimentos al conjunto turbina, y lo más importante, se han reducido las condiciones de riesgo que puedan desencadenar situaciones de peligro para los trabajadores de la PCH.

.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de control electrohidráulico para operación de compuertas de salida en tanque desarenador de la pequeña central hidroeléctrica Guanaquitas.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos para el diseño del sistema de control, que permitan una operación rápida, segura.
- Definir los componentes y equipos necesarios para el control de las compuertas con base en el análisis de los requerimientos
- Proyectar los sistemas eléctricos, de control e hidráulicos
- Desarrollar un programa de automatización para el funcionamiento del sistema de compuertas

3.Marco teórico

3.1 Marco de referencia

Para llevar a cabo el diseño planteado en este proyecto, se siguieron las indicaciones detalladas más adelante en la metodología. Las actividades iniciaron con la visita técnica a las instalaciones, lo que facilitó la recolección de información y el levantamiento de los requerimientos para los subsistemas (oleohidráulico, eléctrico y control). Posteriormente, se utilizaron procedimientos de cálculos en cada subsistema, lo que funcionó apropiadamente para obtener un diseño final como se muestra en los resultados.

3.2 Marco de antecedentes

Las compuertas, junto al sistema de accionamiento, son equipos necesarios en una central hidroeléctrica. Estos equipos tienen una variedad de funciones, desde permitir la operación, el mantenimiento en las turbinas, control del fluido en la conducción, control de ingreso en canales, y control de inundaciones en caso de emergencia, entre otros.

La importancia de las compuertas y su mecanismo de accionamiento rápido está representada con el acontecimiento de la central hidroeléctrica de Sayano – Shushenskaya en año de 2009, la mayor central de Rusia y la quinta del mundo en producción de energía. La central tenía 10 turbinas de 640 MW de capacidad instalada cada una. El 17 de agosto de 2009 a las 8:13 a.m., la turbina 2 estalló cuando generaba 475 MW con un caudal de 256 m³/s y bajo una carga de 212 m de altura. La ruptura de la turbina causó la inundación de la casa de máquinas. El cierre de todas las compuertas de emergencia tuvo que ser realizado manualmente y no se completó sino hasta las 9:30 a.m., tiempo hasta el cual la inundación continuó, cobrando finalmente la vida de 75 trabajadores de la central. Actualmente, como parte de la reconstrucción de la central, se ha instalado un sistema de cierre automático para las compuertas (Wikipedia 2011a).

Los mecanismos de cierre de las compuertas de emergencia deben diseñarse para cerrar durante la operación de la central a potencia máxima; es decir, bajo la máxima carga hidráulica y máximo caudal. El ingeniero Paulo Erbisti al plantear el diseño para una

compuerta hidráulica contempla los principios de la hidrodinámica y la hidrostática según el caso de aplicación, como también el comportamiento de fuerzas que ejerce el líquido sobre las superficies sumergidas; además discute de los equipos asociados con el accionamiento y los métodos de cálculos a desarrollar.

Algunos proyectos en Colombia donde se cuenta con un tipo de compuertas con accionamiento electrohidráulico que funcionan de manera apropiada y son esenciales para el proceso de generación de energía en nuestro país son:

- Hidrosogamoso: en la zona de la presa cuenta con un vertedero del tipo canal abierto controlado con compuertas, que tiene como finalidad evacuar los excesos de agua cuando se supera la capacidad de almacenamiento del embalse. En el sistema de carga se alojan tres compuertas de accionamiento electrohidráulico que controlan el ingreso de agua en este sitio, y permiten el cierre para labores de inspección o mantenimiento (Manual de operación y mantenimiento CH Hidrosogamoso – ISAGEN S.A.S E.S.P)
- Hidroituango: es el proyecto hidroeléctrico más grande de Colombia; en la estructura de la captación tiene un conjunto de ocho túneles de conducción, cada uno con compuertas que permiten la apertura o cierre del paso del agua según se requiera, además de contar con ocho pozos verticales que transportan las aguas del río Cauca hasta casa de máquinas.
- CH San Miguel: se encuentra ubicada en el municipio de San Luis (Antioquia – Colombia); funciona a filo de agua y a partir de este principio, se inicia el proceso de generación de manera controlada utilizando un par de compuertas planas de regulación, que permiten el ingreso de agua al canal de conducción. Para los excesos de agua y retirar el material vegetal concentrado en la bocatoma, se utilizan las compuertas radiales. Los mecanismos de accionamiento de las compuertas mencionadas son del tipo oleohidráulico automatizados con función prioritaria para el cierre de emergencia. (Manual de operación y mantenimiento CH San Miguel – ISAGEN S.A.S E.S.P)

3.3 Definiciones y conceptos de una PCH

3.3.1 Pequeña central Hidroeléctrica (PCH)

Comúnmente suele definirse a una pequeña central hidroeléctrica (PCH) como una fuente de generación de energía eléctrica, donde el cauce de un río proporciona energía potencial desde un nivel alto y al entrar en movimiento relativo se obtiene una fuerza hidráulica que permite la rotación de una turbina bien sea del tipo Francis, Pelton o Kaplan acoplada a un generador, transformando de esta manera energía mecánica rotativa en energía eléctrica (Osorio Londoño, 2017).

Las PCH son un mecanismo de desarrollo limpio implementado en Colombia desde el año 1889 y que luego de algunos periodos de crisis energética se logra el inscrito de la ley 141 y 143 de 1994 y la ley 1715 de 2014. Su sistema de generación permite incrementar la disponibilidad de energía sin tener que usar combustibles fósiles que afecten la atmósfera como lo hacen el petróleo y el carbón (GRUPO DE INVESTIGACION XUÉ SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN BARIÓN, 2020). Durante proceso de generación de energía el agua retorna al río sin que se adicionen sustancias químicas, ni sufra transformaciones. Al utilizar el agua que fluye naturalmente por el río se produce energía eficiente y limpia, contribuyendo a la protección del medio ambiente (Moscoso 2013).

3.3.2 Funcionamiento de una PCH

A continuación, explicaré el funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica que opera bajo el sistema filo de agua y las cuales traen grandes beneficios para el medio ambiente.

Las centrales hidroeléctricas a filo de agua no cuentan con presa, aprovechan la corriente de un río para generar el movimiento que hace girar las turbinas y producen la electricidad. Comúnmente tienen un vertedero o azud que mediante unas rejillas de aducción toman el agua necesaria para la generación, una vez captada el agua pasa a un desgrabador que atrapa las rocas y devuelve partes de estas al cauce natural del río garantizando un caudal ecológico (Segura Usuriaga, 2019).

El agua destinada para la generación de energía pasa por el canal de aducción al desarenador, compuestos por módulos que permiten remover arenas, sedimentos y otros elementos. El agua que no se va a utilizar se devuelve al río mediante un vertedero de

excesos, el fluido final es conducido por la tubería de presión hasta la casa de máquinas. En casa de máquinas se encuentran los equipos de generación que convierten la fuerza del movimiento del agua en electricidad que pasa a los transformadores y luego es dirigida al exterior por medio de líneas de transmisión hasta llegar a una subestación cercana donde se conecta y distribuye energía al sistema interconectado nacional.

3.3.3 Clasificación de las PCH

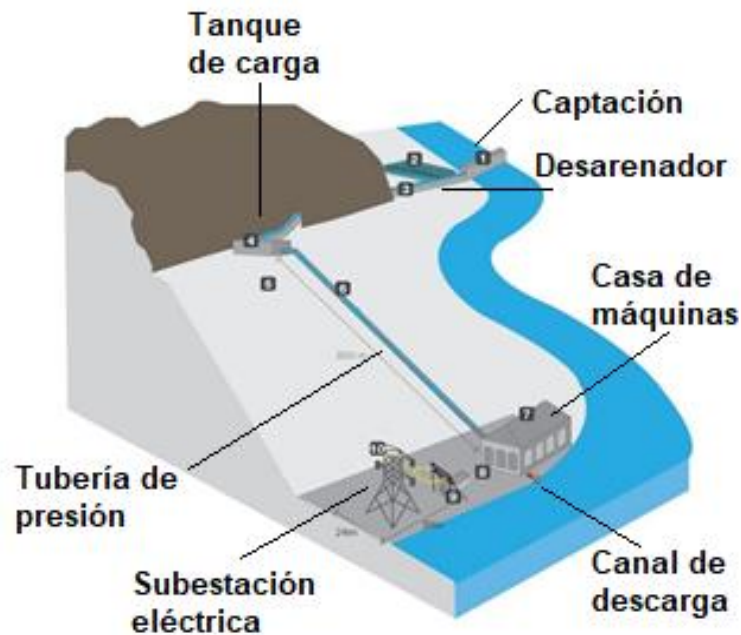
La clasificación de las PCH en Colombia está determinada por la Unidad de Planeación Minero Energética -UPME, que es una unidad especial administrativa que pertenece al Ministerio de Minas y Energía y ha definido la siguiente clasificación basándose en la capacidad de la potencia instalada (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2015).

Picocentrales: Tienen una capacidad instalada entre 0,5 y 5 kW, con modalidad de operación a filo de agua, aplicables a zonas no interconectadas

- **Microcentrales:** Tienen una capacidad instalada entre 5 y 50 kW, con modalidad de operación a filo de agua, aplicables a zonas no interconectadas
- **Minicentrales:** Tienen una capacidad instalada entre 50 y 500 kW, con modalidad de operación a filo de agua, aplicables a zonas no interconectadas
- **Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH):** Tienen una capacidad instalada entre 500 y 20.000 kW, con modalidad de operación a filo de agua, aplicables a zonas no interconectadas y zonas interconectadas. Estas no tienen posibilidad de participar en el despacho eléctrico desde el CND (Centro Nacional de Despacho).
- **Centrales hidroeléctricas (CH):** Tienen una capacidad instalada mayor de 20 MW, con modalidad de operación a filo de agua o embalse, además son aplicables a zonas interconectadas y tienen despacho eléctrico obligatorio con el centro nacional de despacho CND.

3.4 Partes principales de una PCH

Las PCH están construidas en las cercanías de un río, el cual resulta ser su afluente hídrico que proporciona las condiciones hidráulicas para generación de electricidad (Elemental, 2016). Para su funcionamiento, se requieren las siguientes partes mostradas en la Figura 1, las cuales se describen a continuación.

Figura 1. Partes principales de una PCH

Nota. Partes principales que conforman las áreas de una pequeña central hidroeléctrica a filo de agua. Fuente: Renovablesverde.com

3.4.1 Captación

Una captación normalmente está localizada en un estrechamiento de montañas que se presenta inmediatamente aguas abajo de la confluencia del río. Esta zona consiste en una pequeña presa vertedero construida en concreto a través del cauce del río, la cual por sus dimensiones no genera embalse. Posee una toma de abertura rectangular al lado del azud para captar el caudal. El diseño de su estructura le permite continuar en funcionamiento aun cuando se presenten obstrucciones temporales por materiales flotantes y soportar peso sobre ella de una creciente.

En esta zona podemos encontrar las siguientes secciones:

- **Canal de conducción:** Es un conducto construido en concreto reforzado tienen forma cuadrada, está provisto de ventanas de reboce para los excesos, en esta sección podemos encontrar compuertas regulación que controlan el flujo de agua que ingresa en el desarenador.

- **Desarenador:** Es una estructura en concreto que funciona como filtro retenedor de las partículas sólidas suspendidas en el agua captada, las partículas contenidas tienen un alto grado de abrasión y resultan nocivas para los equipos de generación, un desarenador convencional está compuesto de dos módulos en forma trapezoidal. De forma que se pueda disponer de un módulo de respaldo para las labores de mantenimiento, además para limpiar cada módulo del desarenador estos poseen canales de fondo con compuertas de descarga de lodos.

3.4.2 Sifón y canal de conducción

Para llevar el agua desde el desarenador hasta el tanque de carga se tiene una conducción a flujo libre. Esta conducción es un canal cerrado de longitud media (1 a 2 km) y tiene una pendiente mínima para permitir que el agua fluya libremente hasta el tanque de carga.

Cuenta con un sistema de sifón que se realizó por la topografía del terreno, además cuenta con un sistema de drenaje para evacuar el agua que se acumule en el sifón y drenar los sedimentos que ahí se acumulan.

Figura 2. *Canal de conducción PCH Guanaquitas*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.4.3 Tanque de carga

El tanque de carga sirve de enlace entre el escurrimiento libre del canal de conducción y el escurrimiento a presión en la tubería de presión. En esta parte se regulan el nivel y caudal de agua que viaja a la turbina, en el sitio se tiene un vertedero de excesos para evacuar la totalidad del caudal de operación en caso de paro de las máquinas. En caso de caudales bajos, el regulador de la máquina debe ajustar la potencia de la unidad hasta ajustarse al caudal disponible.

En la entrada de la tubería se dispone de una reja fina con el objeto de evitar la entrada de elementos extraños arrastrados por el agua, los que podrían obstruir o dañar los rodetes de las turbinas. El tanque de carga tiene una sección rectangular cuyo ancho queda definido por la velocidad admisible en las rejas. La profundidad de la cámara de carga junto a las rejas queda definida por la sumergencia, que está dada por altura entre el nivel del agua y la boca de succión de la tubería y se requiere para impedir la formación de vórtices, los que pueden introducir aire hacia la tubería de presión.

Figura 3. *Tanque de carga PCH Guanaquitas*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.4.4 Tubería de presión

A partir del tanque de carga se inicia la conducción a presión que en su tramo inicial consiste en una estructura de cajón o “box-culvert” de sección circular. El cajón empalma con una tubería de presión en poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Finalmente, la tubería se empalma con un tubo metálico de acero al carbón que también conecta a la válvula mariposa que alimenta la carcasa espiral de la turbina. La válvula tipo mariposa permite aislar la turbina para eventuales mantenimientos.

Figura 4. *Tubería de presión PCH Guanaquitas*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.4.5 Casa de máquinas

La casa de máquinas está constituida por una edificación superficial de tipo convencional localizada a un margen del río, a un nivel que la protege de eventuales inundaciones durante las crecientes. Dentro de esta caseta se pueden encontrar tres niveles. El nivel inferior llamado tanque de nivel freático donde se disponen de conjuntos de bombas que evacuan el agua del filtrado subterráneo y el agua de descarga del sello de la turbina.

El nivel intermedio es donde se encuentran los equipos de generación llamado piso de turbina o piso de equipos electromecánicos, están alojados los equipos: una turbina que puede ser tipo Francis o Pelton, un generador eléctrico, los equipos auxiliares mecánicos y un puente grúa para montaje y mantenimiento de los equipos.

El nivel principal al que se llega directamente cuando se accesa al central llamado sala de montajes, al lado del área de montajes se encuentra la sala de operación desde donde se controlan todos los equipos de la central. Adicionalmente en las afueras de la casa de máquinas se encuentra una subestación de generación en la que se aloja el transformador de potencia y los equipos de patio.

Figura 5. Edificación de casa de máquinas



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.4.6 Canal de descarga

Las aguas turbinadas son entregadas nuevamente al río a través de un canal de descarga. Este es del tipo trapezoidal, excavado en tierra, con una pendiente del 0,20%, y protegido con enrocado. A la salida de casa de máquinas hay un tanque de quietamiento con recubrimiento en concreto. La entrega de agua se efectúa por medio de una estructura escalonada para disipar la energía del líquido y no generar socavación en el suelo.

Figura 6. *Canal de descarga Guanaquitas*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.4.7 Subestación eléctrica

Para la conexión de la central al sistema de distribución de energía, se cuenta con una subestación eléctrica del tipo convencional con un transformador trifásico elevador de tensión de 11,5 MVA, con relación 13,8 kV/44 kV, conectado a un campo de línea con un interruptor de potencia tripolar de 55 kV de mando motorizado, seccionador mono polar manual accionado por pértiga hacia el lado de la línea y seccionador de mando manual con enclavamiento eléctrico hacia el lado del generador.

Figura 7. Subestación de generación 44kV



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5 Equipos y sistemas

Los equipos que podemos encontrar en una PCH son del tipo eléctricos y electromecánicos, se encuentra dispuesto en casa de máquinas a continuación se nombran los principales:

3.5.1 Válvula de admisión tipo mariposa

La válvula de admisión tipo mariposa sirve de órgano de guardia y aislamiento de la central, con la cual se controla el potencial hidráulico. La válvula de admisión las podemos encontrar de eje horizontal y de tipo bi-excéntrica con tendencia al cierre. La apertura se realiza a través de un servomotor de simple efecto y el cierre se realiza por medio de un contrapeso. El servomotor es operado por el grupo oleohidráulica de la turbina y va montado sobre una base de concreto al lado del cuerpo de la válvula.

El cuerpo de válvula es de construcción mecano-soldada en acero al carbono, con bridas para su conexión a la tubería forzada y al carrete de desmontaje, que a su vez se conecta a la carcasa espiral. La estanqueidad en el cuerpo se realiza por medio de un anillo de acero inoxidable.

El disco de cierre es también de construcción mecano-soldada en acero al carbono. Lleva alojada la junta de estanqueidad fabricada en caucho de nitrilo butadieno, la cual queda fijada al disco de cierre por medio de un anillo de acero inoxidable atornillado, que permite sustituir la junta de estanqueidad sin tener que desmontar la válvula y ajustar la presión de la junta respecto al anillo de cierre.

La válvula lleva patas de apoyo que permiten el montaje. Las patas y la base permiten movimiento longitudinal para absorber dilataciones y esfuerzos.

Para abrir la válvula de mariposa, la presión antes y después del disco de cierre debe ser equilibrada. Por lo que el sistema está equipado con un By-pass desde aguas arriba de la válvula de mariposa hasta el carrete aguas abajo de la misma. Este by-pass lleva integradas una válvula de aislamiento manual y otra accionada mediante servomotor hidráulico, el cual está operado por el grupo olehidráulico de la turbina.

Figura 8. *Válvula de admisión con contrapeso*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5.2 Válvula By-pass

El By-pass proporciona la condición de equilibrio de presiones a ambos lados de la válvula mariposa. El By-pass permite el llenado de agua de la turbina con la válvula mariposa cerrada. Comprende un tubo de acero inoxidable con extremos bridados. En el extremo aguas abajo lleva montada una válvula de aguja operada por un servomotor de doble efecto que es accionado por el grupo oleohidráulico de la turbina. Esta válvula se monta sobre una brida de acoplamiento que se encuentra unida a la tubería forzada.

En el extremo aguas arriba lleva montada una válvula manual que permite el mantenimiento de la válvula automática anteriormente citada sin tener que vaciar de agua la tubería forzada. Esta válvula manual se monta sobre una brida de acoplamiento que se encuentra unida en la tubería forzada fabricado para tal fin.

Figura 9. *Válvula By-pass*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5.3 Unidad de potencia hidráulica (HPU)

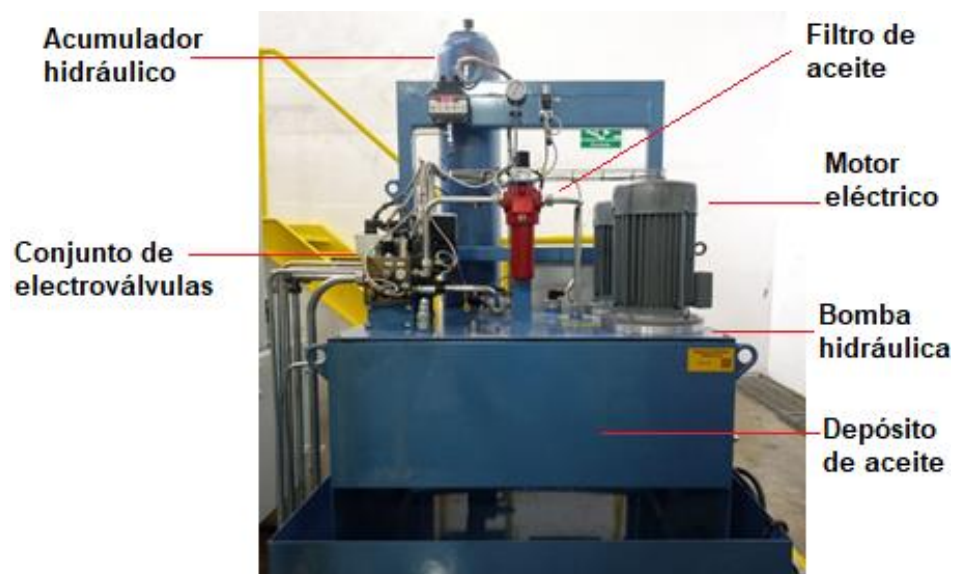
La unidad de potencia oleohidráulica es un conjunto de regulación que proporciona el accionamiento mediante electroválvulas a los siguientes elementos:

1. Distribuidor de turbina – regular de velocidad
2. Válvula de seguridad tipo mariposa
3. Válvula By-pass

Todos los componentes electrohidráulicos (presostatos, filtro, electroválvulas) están instalados sobre o cerca del tanque de aceite o depósito, la HPU contiene dos conjunto motor - bomba uno principal y otro de respaldo, el que se encuentre en servicio opera de forma continua. La bomba de respaldo se pondrá en marcha en caso de fallo la principal o por señal de filtro colmatado. Está equipada con un acumulador tipo vejiga que almacena un volumen específico de 40 litros de aceite como respaldo en caso de falla de las bombas de suministro.

Un servo válvula de accionamiento proporcional de 4-20 mA comanda la operación del distribuidor, junto a esta se encuentra una electroválvula direccional normalmente cerrada que comanda la apertura de la válvula de seguridad y por último una electroválvula direccional normalmente abierta para comandar la apertura y cierre de la válvula By-pass.

Figura 10. HPU unidad de potencia hidráulica



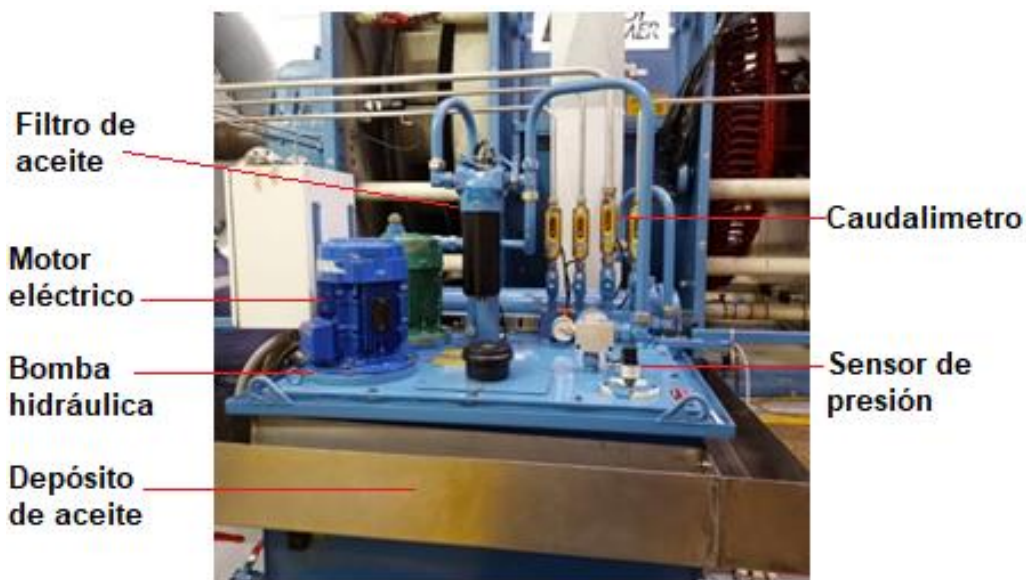
Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5.4 Unidad de lubricación

El principio de funcionamiento consiste en utilizar una bomba de accionamiento mecánico cuya rotación es generada por un sistema de bandas y poleas para repartir o distribuir aceite desde un depósito central hacia los puntos de lubricación de forma completamente automática. Este sistema aporta perfectamente las cantidades de aceite especificadas por los fabricantes de maquinaria. Todos los puntos de lubricación alcanzados reciben el suministro óptimo de lubricante, reduciendo el desgaste. Como consecuencia se incrementa considerablemente la vida de servicio de los elementos de la máquina y a su vez se reduce el consumo de lubricante.

La unidad está compuesta por un depósito o tanque de almacenamiento sobre el cual se aloja una bomba de accionamiento mecánico, filtro de limpieza de partícula metálicas, sensores de termo resistivos para el monitoreo y control de la temperatura en el sistema.

Figura 11. *Unidad de lubricación*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5.5 Conjunto turbina

La turbina Francis convierte la energía del agua en energía rotatoria que pone el alternador en movimiento y produce energía eléctrica.

Las turbinas son de cámara espiral en acero al carbono y van instaladas con un giro de 30° en sentido de las agujas del reloj. El rodete Francis es fabricado en acero inoxidable va acoplado directamente al eje de turbina inferior, en el cual se monta en el cojinete guía. Sobre el eje inferior va acoplado el eje intermedio, que es desmontable, y que acopla a su vez con el generador. Éste dispone de un cojinete guía y otro combinado para soportar los esfuerzos.

El distribuidor de la turbina es actuado por un servomotor de doble efecto. El mecanismo del distribuidor se monta a un lado de la carcasa espiral. La tapa de turbina se atornilla al anillo de traviesas y el anillo distribuidor va integrado en la misma. Un grupo oleohidráulico de presión acciona el servomotor del distribuidor y de la válvula de mariposa, By-pass, que van integrados en los mismo.

Todas las partes de las turbinas están diseñadas para soportar los esfuerzos en servicio normal, así como en condiciones excepcionales de funcionamiento hasta los límites garantizados.

Figura 12. *Conjunto turbina y rodete Francis*



Fuente: (elaboración propia 2022)

3.5.6 Generador

Máquina eléctrica que convierte la energía mecánica rotativa en energía eléctrica. El generador es tipo sincrónico, con rotor de polos salientes, eje horizontal, de excitación Brushless, en generadores de media tensión diseñado y fabricado de acuerdo con los últimos desarrollos tecnológicos. Con capacidad de generación de potencia aparente de 11461 kVA, a un nivel de tensión de 13.8 kV trifásico, es del tipo autoventilado y cumple con el estándar IEC 60034-7, se encuentra instalado en casa de máquinas.

Todas las partes del equipo resisten los esfuerzos eléctricos y mecánicos experimentados en la operación normal, tales como sobre velocidad, embalamiento, fallas de sincronización y fuerzas de sismos. El generador tiene una buena estabilidad cuando opera en paralelo con el resto del sistema de potencia y las operaciones de regulación se realizan sin que se presenten perturbaciones e inestabilidades en el sistema eléctrico de potencia. El grado de protección de la máquina es IP23.

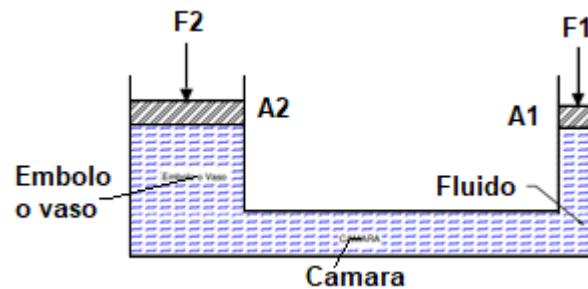
El modo de funcionamiento del generador es por medio de red interna interconectada con acoplamiento sobre red exterior con tensión y regulación de factor de potencia, tanto en manual como automáticamente.

3.6 Estática de fluidos

Se considera un líquido en estado estable cuando todas las partículas que lo conforman se encuentran en reposo o mantiene una velocidad constante respecto al sistema de coordenadas inercial. Los líquidos al ser sometidos a grandes presiones tienen una variación muy pequeña en su densidad por lo que se consideran incompresible, característica que facilita los procedimientos de cálculos.

3.6.1 Principio de Pascal

Blaise Pascal, en su principio físico define que la presión ejercida en la superficie de un fluido incompresible almacenado en un recipiente cerrado se transmite en todas las direcciones con la misma intensidad en los muros del contenedor. La presión en cualquier punto del fluido es uniforme en todas las direcciones. La prensa hidráulica es la herramienta que hace fácil la interpretación y comprensión de principio de Pascal.

Figura 13. Prensa hidráulica de Pascal

Fuente: (elaboración propia 2022)

Como se indica en la imagen, al aplicar una fuerza F_1 se origina una presión $P_1 = F_1/A_1$. Cuya presión se transmite uniformemente en todas las direcciones de la masa del fluido por lo que el émbolo de mayor sección soportará una fuerza F_2 con una magnitud establecida como $F_2 = P_1 * A_2$. Que en función de la geometría que tiene la prensa se obtiene la fórmula siguiente:

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (1)$$

Donde:

$P =$ Presión

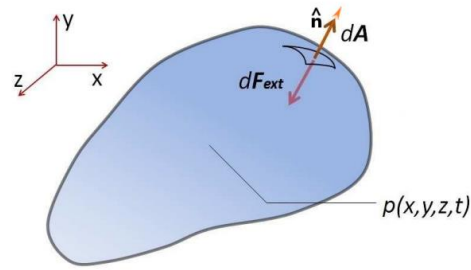
$F_1; F_2 =$ Fuerza aplicada en la superficie

$A_1; A_2 =$ Área donde se aplica la fuerza

3.6.2 Fuerza hidrostática

Es el vector unitario resultante de la sumatoria de fuerzas que ejerce cada punto del fluido a presión sobre el área de cada elemento.

Su expresión matemática está dada de la siguiente manera:

Figura 14. Aplicación de la fuerza hidrostática en un área o superficie

Fuente: (elaboración propia 2022)

Vector diferencial de área: $d\vec{A} = \hat{n} dA$

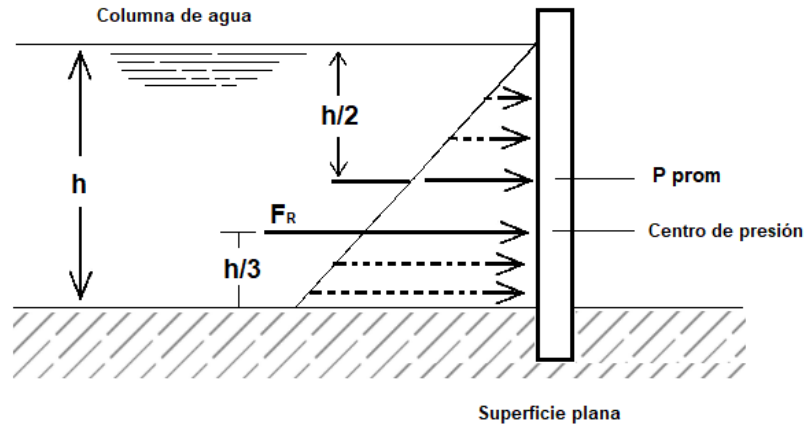
Fuerza sobre cada $d\vec{A}$: $d\vec{f} = p d\vec{A}$

La fuerza sobre toda la superficie A será, pues, la integral de área sobre todo A :

$$\vec{F}_H = \iint_A d\vec{f} = \iint_A p d\vec{A} \quad (2)$$

3.6.3 Fuerza hidrostática en superficies planas sumergidas

Es la fuerza de la presión de una columna de agua sobre una superficie plana en posición vertical inmersa en un líquido, la cual se ejerce de manera perpendicular a la superficie. Los muros de contención, las compuertas planas deslizante, son un claro ejemplo de esto, donde se exponen a una presión que varía desde cero en el nivel superior del agua, hasta un valor máximo que depende de la altura y el peso específico del fluido. La Fuerza hidrostática tiende a hacer rotar la pared o romperla en el fondo donde está fija.

Figura 15. Fuerza hidrostática en superficies planas

Fuente: (elaboración propia 2022)

La presión de un fluido aumenta con la profundidad porque descansa más fluido sobre las capas más profundas, y el efecto de este “peso adicional” sobre una capa más profunda se equilibra por un aumento en la presión. En la figura 15 se ilustra que la presión varía en forma lineal con la profundidad del fluido, las longitudes de las flechas punteadas representan la magnitud de la presión en puntos diferentes sobre la superficie plana sumergida.

La fuerza hidrostática resultante se calcula usando las siguientes ecuaciones:

$$\vec{F}_H = \int_A P dA$$

$$\vec{F}_H = \int_A \rho g z dA = \rho g \int_A z dA \quad (3)$$

Primer momento de área es: $\int_A z dA$

Coordenada del centroide o centro de la superficie (“promedio”):

$$Z_c = \frac{1}{A} \int_A z dA ; Z_c = h/2 \quad (4)$$

Al sustituir el promedio da como resultado la ecuación:

$$\vec{F}_H = \rho g Z_c A \quad (5)$$

$$|\vec{F}_H| = \rho g \frac{h}{2} A \quad (6)$$

Al relacionar el peso específico y la densidad del agua tendremos una expresión para la presión promedio:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$$P_{pro} = \gamma(h/2)A \quad (7)$$

Centro de presión

Está ubicado en el centroide del triángulo de distribución de la presión, a un tercio de la distancia desde el fondo de la superficie sumergida. Coincide con la línea de acción de la fuerza hidrostática resultante calculada mediante las ecuaciones anteriores.

$$P_c = h/3 \quad (8)$$

En las ecuaciones anteriores, se tiene:

γ : peso específico del agua

A : área contacto de la compuerta o área proyectada

ρ : densidad de fluido (agua)

g : Fuerza de gravedad

h : altura de columna de agua o profundidad total del líquido

$h/3$: Distancia de centro de presión

3.7 Compuertas hidráulicas

Una compuerta es un equipo en forma de placa cuadrada, rectangular o curva móvil, que permite el control del flujo de líquidos que se emplean en tuberías, en un canal, esclusas u estructuras para centrales hidráulicas (Alonzo Vásquez, 2013). Son operadas por mecanismos de tipo tornillo sin fin, cables, cadenas, grúas pórticos, servomotores hidráulicos, entre otros, estos permiten la carrera de apertura y cierre.

Seleccionar el mecanismo de accionamiento para una compuerta está condicionado principalmente por las fuerzas hidráulicas de operación que actúan en la superficie de la compuerta. Así mismo, el tipo de compuerta condiciona la configuración de la obra civil en

el proyecto; por lo tanto, la selección de la compuerta es fundamental, incluso desde la etapa de prefactibilidad y diseño conceptual.

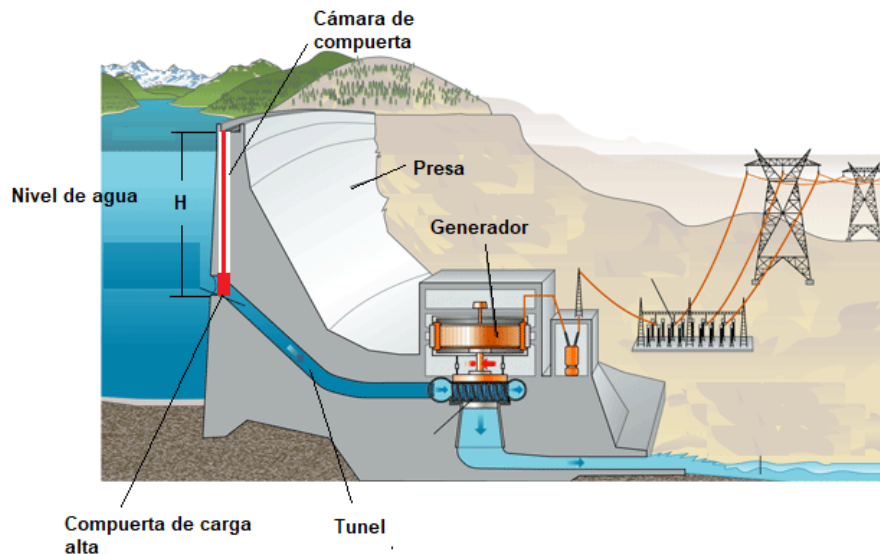
3.7.1 Clasificación de las compuertas

Podemos clasificar las compuertas hidráulicas en dos grandes grupos según la cabeza hidráulica de sometimiento. La cabeza hidráulica en una compuerta está definida por la profundidad de agua H medida desde el nivel de agua hasta la solera o fondo de la compuerta cerrada. Las compuertas se clasifican como:

- **Compuertas de carga alta**

Las compuertas de carga alta (high head) son aquellas en las que la altura de la columna de agua (H) es mucho mayor que el tamaño de la compuerta (Naudascher, 1991); siendo $H > 30$ m el criterio normalmente aceptado para dicha clasificación (Erbisti, 2004). Un tipo común de compuerta de carga alta es aquella utilizada para el cierre de emergencia de una toma que alimenta el túnel a presión de una central hidroeléctrica. Las compuertas de emergencia operan completamente abiertas o completamente cerradas y suelen ser compuertas planas deslizantes montadas en rodillos.

Figura 16. Compuerta de carga alta

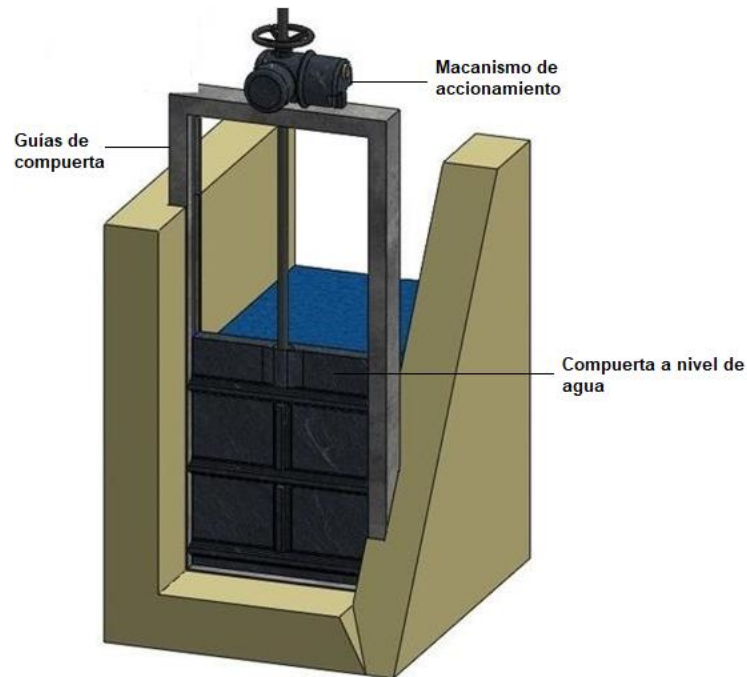


Fuente: (elaboración propia 2022)

- **Compuertas de carga Baja**

Las compuertas de cargas bajas son aquellas en el que la columna de agua es igual o menor al tamaño de la compuerta; Un tipo común de compuerta de carga baja son las de servicios que se utilizan para regular caudal.

Figura 17. Compuerta de carga baja a nivel de la columna de agua

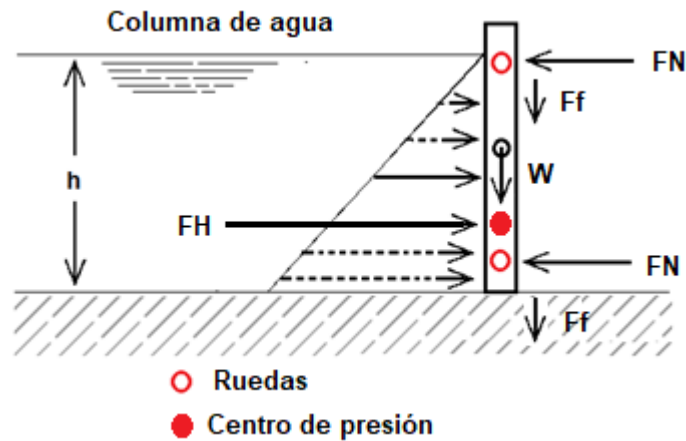


Fuente: (elaboración propia 2022)

3.7.2 Fuerzas que actúan en una compuerta de carga baja

Las diferentes fuerzas asociadas a la interacción del fluido con la compuerta están en función a la fuerza hidrostática y al desplazamiento vertical para abrir o cerrar. De la sumatoria de dichas fuerzas actuantes se obtiene la resultante y debe considerarse en el diseño de los mecanismos de accionamiento.

Las fuerzas que actúan sobre la compuerta son mostradas en la Figura 18.

Figura 18. Fuerzas que actúan en una compuerta de carga baja

Fuente: (elaboración propia 2022)

FH: Fuerza hidrostática concentrada en el centro de presión

FN: Fuerzas normales generadas como reacción a la fuerza hidrostática (ejercida en la rueda - se considera uniforme)

W: Peso de la compuerta, actúa sobre su centro de gravedad

Ff: Fuerza de fricción opuesta al movimiento, estas actúan sobre las ruedas del sistema

Debido a que estas fuerzas es el resultado de la interacción entre la compuerta y el fluido, la geometría de la compuerta juega un papel fundamental, especialmente la longitud del lado inferior y el ancho.

- Fricción

Es la resistencia al movimiento que existe cuando un objeto sólido se mueve tangencialmente con respecto a la superficie de otro sólido con el que está en movimiento. La fricción se expresa en términos relativos de fuerza, como el coeficiente entre fuerza de fricción y la carga nominal a la superficie de contacto, suele representarse por, que es un coeficiente adimensional, es decir, carecen de unidades ya que las dos fuerzas se miden en las mismas unidades. (Nieto, 2007).

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (9)$$

Donde:

F : Fuerza de rozamiento

μ : Coeficiente de rozamiento o de fricción

N : Fuerza normal

Hay que distinguir entre dos situaciones:

Fuerza de fricción estática: la necesidad para iniciar el movimiento. Si la fuerza tangencial aplicada es menor a este valor, no existe movimiento y la fuerza de fricción es igual a mayor a la tangencial aplicada.

Fuerza de fricción cinética o dinámica: la necesidad para mantener el movimiento. De valor menor a la anterior. Las leyes fundamentales de la fricción son:

$$F = \mu N \quad (10)$$

Donde:

F : Fuerza de rozamiento

μ : Coeficiente de rozamiento o de fricción

N : Fuerza normal

La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto. Por esta razón objetos grandes y pequeños del mismo par de materiales, presentan el mismo coeficiente de fricción.

A continuación, se ilustra la tabla 1 que contiene el valor del coeficiente de fricción estático en materiales típicos.

Tabla 1.

Coeficiente de fricción típicos

Material	μ Estático
Hule sobre concreto	1,0
Acero sobre acero	0,74
Vidrio sobre vidrio	0,94
Cobre sobre cobre	0,53
Madera sobre madera	0,25 – 0,5
Teflón sobre teflón	0,04
Hielo sobre hielo	0,1

3.7.3 Tipos de compuertas

Un segundo nivel de clasificación en compuertas está determinado por las condiciones físicas, climáticas y de operación. En términos generales, los tipos más comunes de compuertas, que se utilizan en diferentes estructuras hidráulicas, son los siguientes (Erbisti, 2004):

- En aducciones: Compuertas de vagón, de oruga o cilíndricas.
- En vertederos: Compuertas radiales con o sin solapa, compuertas de vagón (de ruedas), compuertas tipo tambor, o compuertas inflables.
- En descargas de fondo: Compuertas tipo Bureau, compuertas de vagón con bonete o compuertas radiales.
- Para mantenimiento: Stop-logs, compuertas tipo bulkhead o compuertas deslizantes.
- Para canales con tráfico de embarcaciones: Esclusas, compuertas radiales con eje vertical, compuertas de ruedas con desplazamiento horizontal.

Compuerta plana de rodillo

Son compuertas planas que han sido diseñadas para controlar el flujo en canales grandes, donde el principal factor para utilizar esta compuerta es la facilidad de operación con mecanismos oleohidráulica.

Figura 19. *Compuerta plana de rodillos*



Compuerta radial

Las compuertas radiales tienen aplicación en centrales hidroeléctricas y se utilizan para controlar el flujo de agua a través de la presa y esclusas de ríos.

Una compuerta radial es una estructura metálica de forma semi-curva con brazos de apoyo en cojinetes o chumaceras, los brazos están colocados en forma radial además cuenta con refuerzos en la parte posterior, son vigas horizontales para reforzar la estructura y dos vigas verticales centrales para transferir la carga hacia los brazos de rotación principales, ubicados en ambos lados.

En los extremos de los brazos radiales, la rotación es posible mediante un muñón montado en el bastidor, ubicado en las paredes de hormigón adyacentes. Este sistema permitirá alcanzar la rotación circular de la compuerta durante las operaciones de «apertura/cierre».

Cuando está cerrada, la superficie curvada exterior de la placa se carga contra la presión del agua con los brazos radiales y el sistema giratorio asociado ubicados en el lado seco.

Figura 20. *Compuerta radial*

Nota. Compuerta tipo radial en proceso de instalación, siendo izada.

Compuerta plana deslizante

Es un tipo de estructura de control en un canal o túnel y recibe este nombre por su accionar de deslizamiento por rieles guías que tiene en su estructura. Es de aplicación para todo rango de presión y cargas variables de flujo de agua.

Figura 21. Compuerta plana deslizante

Nota. Compuerta plana de accionamiento manual, con volante superior unidad con tronillo sinfín.

3.7.4 Equipos de accionamiento y elementos asociados

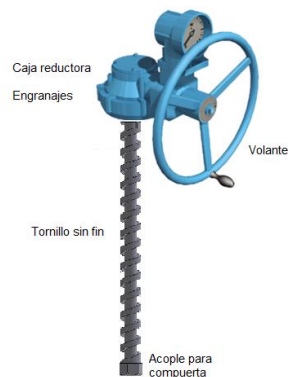
Una vez seleccionada y definida las dimensiones básico de las compuertas, se debe determinar la configuración de su equipo de accionamiento y los elementos asociados. El equipo de accionamiento se refiere al mecanismo que opera la compuerta en su carrera de apertura y cierre. Algunos de estos elementos son los tornillos sinfín, cables, cadenas, servomotores oleohidráulicos, neumáticos, grúas pórtico, entre otros.

Para una adecuada elección del tipo de accionamiento de la compuerta está condicionado principalmente por las fuerzas de operación, sin embargo, se deben tener en cuenta otros factores como la disponibilidad de suministro eléctrico, la frecuencia de operación de la compuerta, la posibilidad de mantenimiento, entre otros.

Accionamiento manual

Tienen un volante unido a una caja reductora, que acciona un mecanismo de engranajes que finalmente desplazan el tornillo sinfín, este último está unido a la compuerta y permite el movimiento para abrir y cerrar.

Figura 22. *Mecanismo de accionamiento manual para compuertas*



Nota. Mecanismo de accionamiento manual de usual aplicación en compuertas pequeñas para Microcentrales.

Accionamiento eléctrico

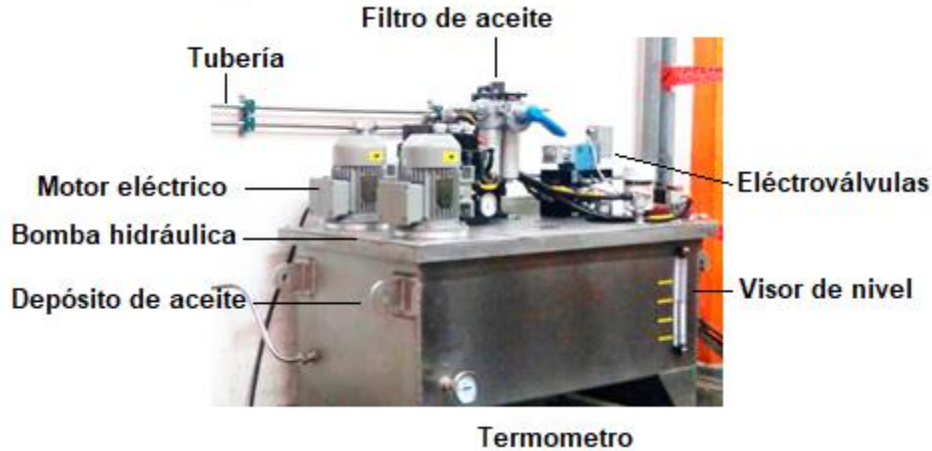
El accionamiento esta comandado por un motor eléctrico que puede ser del tipo monofásico o trifásico según la instalación eléctrica, la rotación del motor es transmitida a una caja de engranajes que hace girar un husillo de forma ascendente o descendente, también los podemos encontrar con cadenas o cables metálicos

Figura 23. *Accionamiento eléctrico para compuertas*



Accionamiento electrohidráulico

También conocido como unidad de potencia oleohidráulica, el accionamiento esta comandado por cilindros de doble efecto y el grupo de presión. Es un sistema en el que se utilizan equipos y componentes que en forma conjunta que realizan la conversión de energía mecánica en energía hidráulica empleando un fluido de trabajo (aceite) para la transmisión de fuerza para mover y hacer funcionar un mecanismo. El aceite es el principal medio para la transmisión de fuerza ya que este para términos prácticos es incompresible además permite lubricar y refrigerar en cierta medida o todos los componentes del sistema.

Figura 24. *Accionamiento electrohidráulico para compuertas*

Nota. Mecanismo de gran aplicación para el movimiento de compuertas de carga alta

3.7.5 Componentes de una unidad de potencia hidráulica

Los componentes son todos aquellos elementos que incorporan el sistema para su correcto funcionamiento, mantenimiento y control. Pueden agruparse en cuatro grupos principales:

1. Bombas o elementos que transforman la energía mecánica en hidráulica.
2. Elementos de regulación y control, encargados de regular y controlar los parámetros del sistema (presión, caudal, temperatura, dirección, etc.).
3. Accionadores, que son los elementos que vuelven a transformar la energía hidráulica en mecánica.
4. Acondicionadores y accesorios, que son el resto de los elementos que configuran el sistema.

A continuación, se definen algunos elementos:

- **Motor eléctrico**

Máquina eléctrica rotativa que convierte la energía eléctrica en mecánica, en un sistema hidráulico está acoplado a la bomba y transmite la rotación para presurizar el aceite.

- **Bomba**

Componente mecánico que succiona, presuriza y expulsa el aceite, transfiriendo la energía al fluido con el fin de permitir su transporte en un circuito hidráulico permitiendo el accionamiento de un cilindro.

- **Válvula**

Componente diseñado para controlar el paso de un fluido y puede ser de accionamiento manual, mecánico, eléctrico de pilotaje hidráulico, etc. las válvulas de accionamiento eléctrico se les conoce como electroválvulas.

- **Manómetro**

Instrumento de medición e indicador para la variable presión en un fluido de tipo gaseoso o líquido como agua, aceite o aire.

- **Actuadores**

Dispositivo mecánico que proporciona fuerza para mover o hacer funcionar un mecanismo hidráulico. La fuerza es proveniente de la unidad de potencia hidráulica, un cilindro de doble efecto es un actuador.

- **Tanque o depósito**

Tienen la función principal de almacenar el aceite de un sistema hidráulico, como también disipar el calor y servir como soporte de algunos componentes tales como la bomba, el motor, el filtro, las electroválvulas

- **Filtro**

Es determinante para realizar la limpieza y retener las impurezas del aceite ya sea al salir o entrar al tanque. Las unidades hidráulicas normalmente están equipadas con dos filtros, uno a la salida de la línea de presión y otro en tanque para filtra el aceite al momento de verterlo.

- **Tuberías y mangueras**

Son los conductos por donde circula el aceite para hacer el recorrido del circuito, las mangueras son conductos flexibles y se utilizan en sistemas móviles y las tuberías son rígidas y se aplican en sistema fijos.

3.7.6 Procedimiento para calcular componentes oleohidráulicos

El procedimiento para realizar los cálculos y determinar componentes en una unidad de potencia oleohidráulica se basa en los siguientes pasos:

Paso 1: Definir la fuerza máxima o fuerza de accionamiento para mover la carga mecánica. (se obtiene de los cálculos de la fuerza resultante).

Paso 2: Definir la presión teórica de trabajo para el sistema.

Paso 3: Calcular accionamiento - cilindro hidráulico

En este paso se realizan varios cálculos para definir los siguiente:

Área mínima efectiva de trabajo:

$$Ae = \frac{F}{P} \quad (11)$$

Donde:

Ae: área efectiva de trabajo

F: fuerza de accionamiento

P: presión de trabajo del sistema

Área del vástago:

$$Av = \frac{\pi}{4} * D^2 \quad (12)$$

Donde:

Av: área del vástago

π : constante pi = 3.14159

D^2 : diámetro del vástago seleccionado

Área estimada de la cámara del pistón:

$$A_{EP} = A_e + A_v \quad (13)$$

A_{EP} : área estimada de la cámara del pistón

A_e : área efectiva de trabajo

A_v : área del vástago

Diámetro del pistón:

$$D\rho = \sqrt{\frac{A_{EP}}{0.7854}} \quad (14)$$

$D\rho$: diámetro el pistón

A_{EP} : área estimada de la cámara del pistón

Área de la cámara del pistón:

$$A_p = 0,7854(D\rho)^2 \quad (15)$$

A_p : Área de la cámara del pistón

$D\rho$: diámetro el pistón

Área de la cámara del vástago:

$$A_{CV} = 0,7854[(D\rho)^2 - (Dv)^2] \quad (16)$$

$D\rho$: diámetro el pistón

Dv : diámetro del vástago seleccionado

Diámetro mínimo del vástago:

$$D_{min} = \sqrt{\frac{64 * F_{max} * L^2 * \alpha}{\pi^3 * E}} \quad (17)$$

Donde:

D_{min} : Diámetro mínimo del vástago

F_{max} : fuerza máxima

E : Módulo de elasticidad $2,1 * 10^6 kg - f/cm^2$ para el acero

L : longitud del vástago o longitud libre de pandeo

α : Coeficiente de seguridad < 3

Espesor mínimo de camisa:

$$e = \frac{D\rho}{2} \sqrt{\frac{R_p + P_i}{R_p - P_i}} - 1 \quad (18)$$

Donde:

e: Espesor mínimo de la camisa.

$D\rho$: diámetro del pistón

R_p : Resistencia practica $2000 kg - f/cm^2$

P_i : Presión interior cilindro en ciclo de máxima carga

Paso 4: Calcular presiones de trabajo según ciclos de trabajo en cilindro

Presión de avance del cilindro:

$$P_A = \frac{F}{A_P} \quad (19)$$

Donde:

F : fuerza de accionamiento

A_p : Área de la cámara del pistón

Presión de retroceso del cilindro:

$$P_R = \frac{F}{A_{cv}} \quad (20)$$

F : fuerza de accionamiento

A_{cv} : área de cámara de vástago

Paso 5: Cálculo de caudales de trabajo según ciclos en cilindro

Como condición se definen las velocidades de avance y retroceso del cilindro teniendo presente la carrera del cilindro:

Caudal avance:

$$Q_A = V * A_p \quad (21)$$

Donde:

Q_A : caudal de avance

V : Velocidad de avance

A_p : Área de la cámara del pistón

Caudal retroceso:

$$Q_R = V * A_{cv} \quad (22)$$

Donde:

Q_R : caudal de retroceso

V : velocidad de retroceso

A_v : área de cámara del vástago

Paso 5: Calcular Desplazamiento volumétrico de la bomba considerando la velocidad de rotación del motor

$$DV = \frac{A_{cv} * v}{Rpm. motor} \quad (23)$$

Paso 6: calcular potencia de la bomba y motor

Para calcular de forma apropiada la potencia de la bomba se debe tener presente la presión y el caudal del cilindro en los ciclos de avance y retroceso:

$$W_B = P_A * Q_A \quad (24)$$

$$W_B = P_R * Q_R \quad (25)$$

Donde:

W_B : Potencia de la bomba

P_A : Presión de avance

Q_A : Caudal de avance

P_R : Presión de retroceso

Q_R : Caudal de retroceso

- **Potencia del motor**

$$W_m = \frac{W_B}{\%n} \quad (26)$$

Donde:

W_m : Potencia del motor

W_B : Potencia de la bomba

$\%n$: eficiencia del motor

Paso 7: dimensionar depósito de aceite

3.8 Conceptos de electricidad

La electricidad es una forma de energía que se define mediante fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas presentes en la materia. Al dividir la materia a nivel de la molécula se encuentra el átomo, el cual está compuesto por un núcleo y una corteza. Por un lado, el núcleo está compuesto a su vez por neutrones, con carga neutra, y protones, con carga positiva. Ambos se encuentran agrupados en el núcleo y forman los nucleones. Y, por otro lado, la corteza se compone por electrones, con carga negativa que orbitan alrededor del núcleo.

La palabra electricidad se deriva de la partícula subatómica el electrón, y su generación se debe a la separación o movimiento de los electrones que forman los átomos.

3.8.1 Magnitudes eléctricas fundamentales

Las propiedades físicas fundamentales de la corriente eléctrica son tres:

- Intensidad
- Tensión
- Resistencia
- Potencia

Intensidad: la corriente eléctrica consiste en un flujo de electrones que van desde un punto con más carga negativa que otro. La intensidad depende del número de electrones que circulen en el circuito. La unidad empleada para su medida es el Amperio (A). Cuando en un circuito se mueve una carga de 63 trillones de electrones (un culombio) en cada segundo, se dice que en el circuito circula una intensidad de un amperio (1 A). Esta unidad es grande, así que nosotros usaremos a menudo un submúltiplo del amperio: el miliamperio (mA), equivalente a una milésima de amperio.

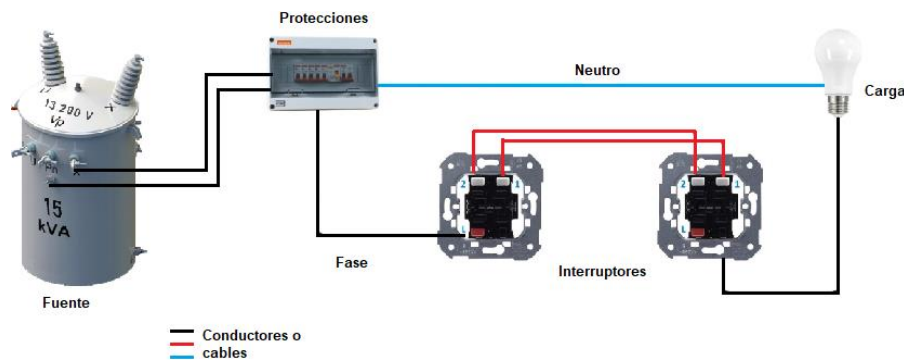
Tensión: Tensión eléctrica, voltaje o diferencia de potencial son tres nombres con los que nos referiremos a la diferencia de cargas eléctricas que existe entre los polos positivo y negativo del generador del circuito. Esta magnitud es indicativa de la cantidad de energía que será capaz de desarrollar la corriente de electrones, para una misma intensidad de corriente. La unidad de medida es el voltio (V).

Resistencia: Es la oposición que presentan a la circulación de los electrones los distintos elementos intercalados en el circuito, incluido el conductor. La unidad de medida es el ohmio (Ω). Esta unidad es demasiado pequeña por lo que es frecuente encontrar múltiplos como el kilohmio ($K\Omega$), equivalente a 1000 Ω , y el megahmio ($M\Omega$), equivalente a 106 Ω .

3.8.2 Circuitos eléctricos

Un circuito eléctrico es el conjunto de componentes eléctricos conectados entre sí que permiten generar, transportar y utilizar la energía eléctrica con la finalidad de transformarla en otro tipo de energía como, por ejemplo, energía calorífica (estufa), energía lumínica (bombilla) o energía mecánica (motor). A continuación, la imagen ilustra los componentes de un circuito eléctrico.

Figura 25. Representaciones físicas de un circuito eléctrico



Nota. Representación de las conexiones físicas de los componentes eléctricos en circuito de baja tensión Fuente: (elaboración propia 2022)

3.8.3 Instalaciones eléctricas

Se le llama instalación eléctrica al conjunto de circuitos concebidos para dotar de energía a un edificio, inmuebles, planta industrial, oficinas, etc. Una instalación de este tipo incluye todos los equipos, cables y microsistemas necesarios para dotar de energía al espacio y permitir la conexión de diferentes aparatos eléctricos. Entre estos elementos se incluyen: tableros, interruptores, transformadores, bancos de capacitores, dispositivos sensores, dispositivos de control local o remoto, cables, conexiones, contactos, canalizaciones y soportes.

Tipos de instalación eléctrica

A continuación, se presentan los diferentes tipos de instalación eléctrica en función de dos aspectos: la tensión requerida y el uso.

Por tensión

Según el artículo 12. Clasificación de los niveles de tensión que se especifica en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE, tendremos las siguientes instalaciones eléctricas:

- Extra alta tensión (EAT): Corresponde a tensiones superiores a 230 Kv
- Alta tensión (AT): Tensiones mayores o iguales a iguales a 57,5 kV y menores o iguales a 230 kV.
- Media tensión (MT): los de tensión nominal superior a 1000 v e inferior a 57,5 Kv
- Baja Tensión (BT): Los de tensión nominal mayor o igual a 25 V y menor o igual a 1000 V.
- Muy baja tensión (MBT): tensiones menores de 25 V.

Por uso

- Instalación generadora: Es aquella instalación que genera energía eléctrica a través de otras fuentes energéticas.
- Instalación de transporte: Aquella instalación que conecta diferentes instalaciones, pudiendo ser de tipo subterránea o aérea.
- Instalación transformadora: Como su nombre indica, recibe la energía eléctrica y la modifican a fin de obtener un tipo concreto de tensión.
- Instalación receptora: La más común de todas, se caracteriza por transformar la energía eléctrica

Por sistema

- Monofásico: sistema generado por la rotación de una solo bobina, se emplea una fase, neutro y tierra (trifilar), también los podemos encontrar bifilar (fase y neutro).

- Bifásico: sistema generado por la rotación de dos bobinas desfasados entre si 90°. Se emplean dos fases (sistema bifilar), también los podemos encontrar trifilar (dos fases y neutro o tierra) y tetrafilar (dos fases, neutro y tierra).
- Trifásico: sistema generado por la rotación de tres bobinas desfasadas entre si 120°, los podemos encontrar pentafilear (tres fases, neutro y tierra).

3.9 Procedimiento para cálculos eléctricos

En este apéndice se dan a conocer los fundamentos técnicos y conceptos teóricos involucrados para calcular circuitos eléctricos en instalaciones de baja y media tensión que incluyen motores. Para ilustrar la aplicación se incluyen datos y conceptos tomados del Código eléctrico colombiano (NTC 2050) como lo especifica en el artículo 430 motores, circuitos de motores y controladores. A continuación, se ilustra la tabla 2 que contiene las fórmulas eléctricas aplicables al procedimiento requerido para la variable a calcular.

Tabla 2.

Fórmulas para calcular variables eléctricas

		Corriente alterna		
	Corriente continua	Monofásico (1~)	Bifásico (2~)	Trifásico (3~)
Corriente conociendo HP	$\frac{HP \times 746}{E \times n}$ (27)	$\frac{HP \times 746}{E \times n \times fp}$ (31)	$\frac{HP \times 746}{2 \times E \times n \times fp}$ (36)	$\frac{HP \times 746}{\sqrt{3} \times E \times n \times fp}$ (41)
Corriente conociendo W	$\frac{W}{E}$ (28)	$\frac{W}{E \times fp}$ (32)	$\frac{W}{2 \times E \times fp}$ (37)	$\frac{W}{\sqrt{3} \times E \times fp}$ (42)
Potencia en W	$I \times E$ (29)	$I \times E \times fp$ (33)	$I \times E \times fp \times 2$ (38)	$\sqrt{3} \times E \times I \times fp$ (43)
Potencia en HP	$\frac{I \times E \times N}{746}$ (30)	$\frac{I \times E \times N \times fp}{746}$ (34)	$\frac{I \times E \times 1,73 \times N \times fp}{746}$ (39)	$\frac{I \times E \times 1,73 \times n \times fp}{746}$ (44)

Factor de potencia	Unitario	$\frac{W}{E \times I}$ (35)	$\frac{W}{2 \times E \times I}$ (40)	$\frac{W}{\sqrt{3} \times E \times I}$ (45)
--------------------	----------	-----------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------------

Fuente: (elaboración propia 2022)

Donde:

I : Corriente en amp

fp : Factor de potencia

E : Tensión en Volt

W : Potencia activa en watt

n : Eficiencia del motor

f : Frecuencia (hertz: ciclos/seg)

HP : Potencia en Horse Power

P : Número de polos

RPM : Revoluciones por minutos

Potencia eléctrica del motor conociendo la potencia mecánica

$$Pot. \text{eléctrica}(W) = \frac{Pot. \text{mecánica}(HP)}{n} \quad (46)$$

Velocidad síncrona: Es la velocidad a la que gira el campo magnético en el motor, se mide en revoluciones por minutos (rpm) se obtiene considerando la frecuencia de la línea f y el número de pares de polos. (4 polos $\rightarrow 2p=4$). Es determinada por la siguiente fórmula:

$$n_s = \frac{120 * f}{2p} \quad (47)$$

Donde:

n_s : Rotación síncrona

f : Frecuencia (Hz)

$2p$: número de polos

Torque: El par de un motor o torque, como también es conocido, es una magnitud física que mide el momento de fuerza que se ha de aplicar a un eje que gira sobre sí mismo a

una determinada velocidad. Es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. Se calcula aplicando la formula siguiente:

$$M = \frac{W}{n_s * 2\pi/60} \quad (48)$$

Donde:

M : Par o torque

W : Potencia eléctrica en Watt

n_s : Rotación síncrona

π : constante pi = 3.14159

Cálculo para calibre del conductor y protección

Como condición inicial para realizar el procedimiento apropiado de los cálculos, es recomendable definir y clasificar las cargas eléctricas del circuito.

Cargas continuas

Cuando la corriente máxima de una carga se prevé que circule durante tres horas o más se denomina carga continua. El enfoque para los cálculos de conductores para las cargas trifásicas continuas se dará a partir de:

- Corriente calculada, para el caso de motores trifásicos se calcula la corriente utilizando la formula (38)
- Los conductores no deben tener una ampacidad menor al 125% de la carga continua - Artículo 210.19 (A)

Con base en los anterior se define las siguientes formulas:

$$I_{conductor} = I * 125\% \text{ (49)}$$

Donde:

I_{conductor}: Corriente del conductor

I: corriente de la carga

125%: Porcentaje de ampacidad para calcular el conductor

Dependiendo del resultado obtenido, se selecciona la protección normalizada según la tabla 240.6 (A) en el Artículo 240.6 (C).

Cargas no continuas

Es la carga que se prevé estará conectada menos tiempo que lo especificado para una carga continua (menos de 3 horas). Las cargas no continuas más comunes que podemos encontrar en una instalación eléctrica son bombilla (iluminación), tomacorrientes, cajas multi-tomas, resistencia de calefacción, ventilación. El método más apropiado para los cálculos de la corriente es el aforo de cargas, el cual permite determinar la capacidad que deben tener los circuitos que conectan los aparatos eléctricos; esto determina el calibre de los conductores y la capacidad de las protecciones.

Tabla 3.

Valores de referencia de potencia consumida por aparatos eléctricos

APARATOS	POTENCIA (VA)
Alumbrado	100
Tomacorriente	180
Resistencia calefacción	100

Nota. Potencia de los elementos de la instalación Fuente: (elaboración propia 2022)

Con base en los anterior se define las siguientes formulas:

$$I = \frac{S}{V} \quad (50)$$

Donde:

I : corriente de la carga

S : Potencia en VA

V : Voltaje de fase

Método de aforo e Cargas: Sumatoria de las capacidades nominales de todos los elementos eléctricos que se encuentren instalados o susceptibles de ser conectados y de las potencias asignadas a las salidas disponibles dentro del inmueble, salvo equipos que se encuentren deteriorados o cuando se pruebe por parte del cliente que no están operando.

3.10 Automatización y control

La automatización consiste en hacer que un proceso se realice de forma automática mediante el uso de dispositivos electromecánicos y electrónicos. En el caso industrial, la automatización, se realiza en la mayoría de los casos utilizando controladores lógicos programables (PLC). La finalidad de automatizar no sólo es facilitar el trabajo de las personas, sino mejorar el rendimiento de producción e inclusive la calidad de los productos. Adicional a esto un proceso automatizado genera la estandarización de la calidad, lo cual permite entregar al usuario productos con estándares de calidad definidos.

La automatización puede realizarse mediante técnicas de lógica cableada y/o lógica programada.

Conceptos generales de la automatización.

Proceso: desarrollo de una serie de acciones encaminadas a obtener un determinado resultado o producto.

Secuencia: sucesión ordenada de varias acciones que tienen relación de dependencia entre sí y constituyen un conjunto.

Etapas: desarrollo parcial de un proceso o una secuencia.

Ciclo: ejecución de todas las etapas de una secuencia (ciclo único).

Ciclo forzado: desarrollo de un ciclo sin posibilidad de ser interrumpido en forma normal

Cíclico: repetición automática de un ciclo (ciclo continuo).

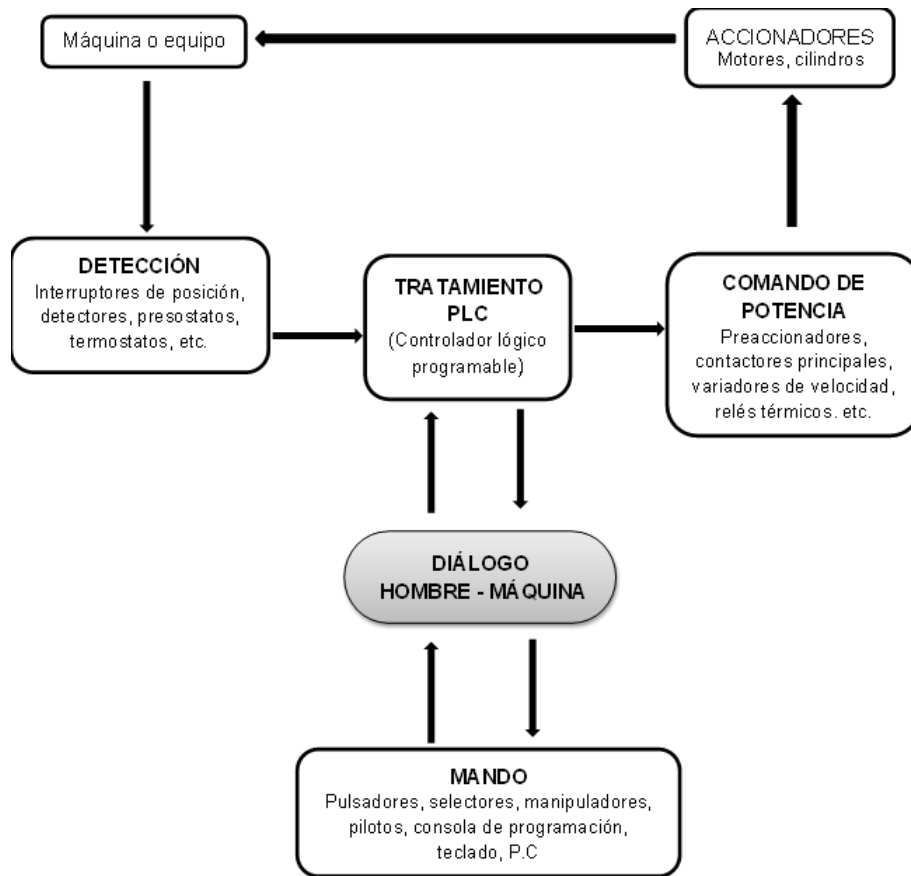
En todo proceso de automatización encontramos:

La parte operativa: compuesta por la maquina en sí y los accionadores.

La parte de comando o automatización: la adquisición y tratamiento de datos, y los preaccionadores.

El dialogo hombre – máquina: en el cual el operario vigila y aporta sus propios datos a los ya adquiridos.

Figura 26. Aspectos de la automatización



Nota. Adaptado de la información de los aspectos de la automatización. (Flower Leiva, 2007)

3.10.1 Equipos para la automatización

Controlador Lógico Programable PLC

Controlador lógico programable (PLC) o autómatas programables es un dispositivo electrónico capaz de estructurar y procesar la información que recibe de elementos conectados a las entradas en forma de programa, para entregar una nueva salida, que permite el funcionamiento automático de una secuencia o de un proceso, así como su optimización.

El PLC sustituye los elementos electromecánicos empleados en la etapa de tratamiento, en un automatismo eléctrico, y además es posible programarlo o modificarlo, sin alterar el

cableado existente, de acuerdo con las necesidades y proceso requeridos, mediante un programador o bien un computador, si se tiene el software e interfaz adecuada.

Figura 27. Controlador lógico programable S7 -1200 SIEMENS



La estructura del PLC está compuesta así:

- *Procesador o unidad central de proceso (CPU):* microprocesador que se usa para el tratamiento de la información o de las instrucciones que contiene el programa, relativos al funcionamiento de la aplicación deseada.
- *Entradas:* sirven para recibir las señales eléctricas precedentes de los elementos empleados en la etapa de detección (sensores, interruptores de posición, presostato, etc.) y mando (pulsadores, selectores) y convertirlas en señales comprensibles para el PLC.

para las entradas es muy común el uso de C.C (24 V), pero también se encuentran PLC en los cuales se usa A.C. (110-120 V), pero en cualquier caso las corrientes son muy pequeñas (mA).

Figura 28. Módulo de entradas digitales - SIEMENS



- **Salidas:** elementos a través de los cuales se transmiten las ordenes de mando y señalización, provenientes del tratamiento y la ejecución del programa, a las bobinas de los contactos principales, electroválvulas o pilotos). Las salidas se pueden realizar a través de relés, transistores o triacs, el número de salidas de un PLC nos da la capacidad del número de preaccionadores que se pueden controlar. Las corrientes que pueden circular por los elementos de salida son normalmente muy pequeñas (mA o a lo más 1 o 2 A), por lo cual es necesario observar muy bien las especificaciones dadas por el fabricante.

Figura 29. *Módulo de salidas digitales – SIEMENS*



Interrupción de posición: También conocido como interruptor de límite o sensor de final de carrera, es un dispositivo que se sitúa al final del recorrido de alguna parte mecánica móvil como puede ser un brazo robot, o el accionamiento de un paro de seguridad de alguna puerta, al final de carrera de un cilindro, es muy utilizado en ambientes industriales.

Figura 30. *Interruptor o final de carrera*



Presostatos: También conocido como interruptor de presión, es un aparato que abre o cierra un circuito eléctrico dependiendo de la lectura de presión de un fluido. Este implemento es necesario para proteger al sistema de sobrepresiones que puedan ocasionar daños. Consta de dos tornillos que permiten ajustar la presión de encendido (presión mínima) y la presión de apagado (presión máxima). La señal del presostato es enviada a una entrada digital del PLC para que este realice la acción de control pertinente cuando el presostato actué (Luvino, 2018, pág. 13).

Figura 31. *Presostato - Telemecanique*



Termostato: Es un componente de un sistema de control que se encarga de abrir o cerrar un circuito eléctrico dependiendo de la temperatura. Se utilizan para *gestionar el sistema de calefacción o refrigeración*, con el fin de mantenerlo encendido sólo cuando sea realmente necesario. Son sistemas de control que funcionan cerrando o abriendo el circuito eléctrico atendiendo a la temperatura.

Figura 32. *Termostato analógico*



Sensores inductivos: Un sensor inductivo tiene la tarea de determinar sin contacto la distancia hasta un objeto metálico. Si no se llega a una distancia determinada (la distancia de conmutación S) el sensor dispara una acción. Por tanto, es una herramienta indispensable en la automatización, p.ej. como ayuda para el guiado de brazos manipuladores de máquinas industriales. No obstante, sus campos de aplicación son claramente más amplios. Así, por ejemplo, un sensor inductivo también puede supervisar niveles de líquidos con ayuda de flotadores metálicos. Su versatilidad lo convierte en un valioso medio auxiliar en todos los sectores industriales y en una gran cantidad de máquinas.

Figura 33. *Sensor inductivo digital*



Accionadores

- **Motor eléctrico:** Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotativas, transforman la energía eléctrica en energía mecánica de rotación en un eje. Tienen múltiples ventajas, entre las que cabe citar su economía, limpieza, comodidad y seguridad de funcionamiento. Su funcionamiento se basa en las fuerzas de atracción y repulsión establecidas entre un imán y un hilo conductor (bobina) por donde hacemos circular una corriente eléctrica.

Figura 34. Motor eléctrico trifásico - SIEMENS



- *Cilindros Hidráulicos:* Los cilindros hidráulicos obtienen la energía de un fluido hidráulico presurizado, generalmente aceite, y consisten básicamente en dos piezas: Un cilindro y un pistón conectado a un vástago. El cilindro está cerrado por los dos extremos, en uno está el fondo y en el otro, la cabeza por donde se introduce el pistón, que tiene una perforación por donde sale el vástago. El pistón divide el interior del cilindro en dos cámaras: la cámara inferior y la cámara del vástago. La presión hidráulica actúa en el pistón para producir el movimiento lineal.

Figura 35. Cilindro hidráulico de doble efector



Comandos.

- *Contactores:* Forma parte de los aparatos de maniobra automática con poder de corte, es un interruptor accionado a distancia mediante la utilización de elementos de comando, tiene la capacidad de establecer o interrumpir la corriente eléctrica de una carga, por medio de un electroimán, los cuales están compuesto por un circuito con bobina por la cual circula una menor corriente que la de carga en sí (incluso podría utilizarse baja tensión para el comando).

Figura 36. *Contactador eléctrico – ABB*



- *Relés electromecánicos:* Podríamos definir relevador o relé como un pulsador que se puede controlar eléctricamente o también como un elemento electromagnético. Su principal función es abrir y cerrar entradas y salidas por mediación de una bobina y un electroimán. El electroimán es la pieza principal que es la que nos permitirá abrir y cerrar las entradas y salidas, y después la bobina crea un campo magnético para establecer una conexión entre ambos.

Figura 37. *Relé electromecánico - Finder*



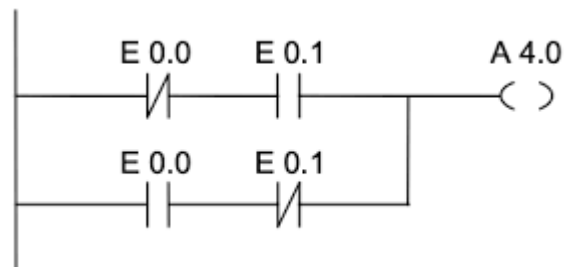
Lenguajes de programación.

Para indicar a un PLC que secuencia debe realizar, antes se debe programar dicha secuencia, generalmente en un computador. Para hacer un programa existen diversos

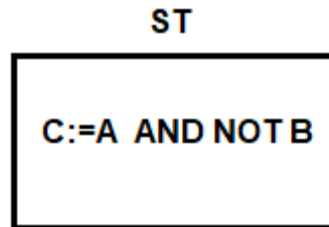
lenguajes, el uso de un lenguaje u otro depende del gusto del programador y en algunos casos del problema a resolver. EL objetivo principal de realizar estos programas es llevarlos a la CPU del PLC para que este lo ejecute. Existe una norma para estandarizar la programación de PLC, la IEC 1131. Dicha norma busca la forma de solucionar necesidades de programación para la automatización industrial, utilizando PLC de diferentes proveedores, con diferentes lenguajes de programación y que puedan ser entendidos por personal de mantenimiento, ingenieros eléctricos, mecánicos y electrónicos. Entre los programas disponibles para programar un PLC, éstos son unos de los más conocidos (Flower Leiva, 2007).

- *Ladder Diagrama (LD)*: Es el programa que más se utiliza para programar PLC. Fue el primero en desarrollarse, por esto presenta muchas semejanzas con diagramas eléctricos en su simbología. Su programación se basa en la activación y desactivación de relés y bobinas, los cuales están asociados con salidas físicas o marcas (memorias internas) del PLC que a su vez envían señales al proceso. En caso de presentarse una falla en el sistema permite encontrar los errores en el programa con mucha facilidad (Moreno Morales, 2019).

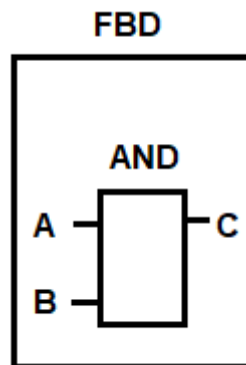
Figura 38. Representación del lenguaje LADDER



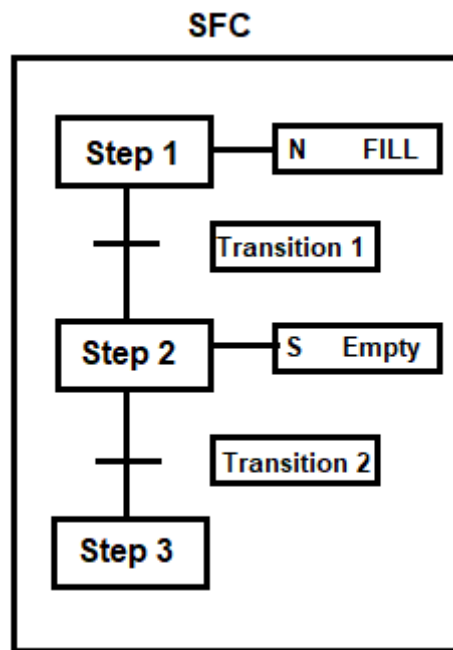
- *Texto Estructurado (ST)*: Consiste en dar instrucciones mediante palabras. Al estar conformado por solo palabras es muy fácil de entender, tanto para el personal técnico como de ingeniería. Es un lenguaje que permite realizar cálculos grandes e instrucciones complejas con relativa facilidad. Se considera un lenguaje de alto nivel. Ocupa menos memoria en el PLC. No obstante, en caso de presentarse una falla en el sistema, encontrar la causa de esta es relativamente difícil (Rodríguez García, 2017).

Figura 39. *Ejemplo lenguaje texto estructurado*

- *Esquema Básico de Funciones (FBD):* Este programa es completamente gráfico, se fundamenta en bloques con operadores conectados entre sí. Esta forma de programar es una analogía a un circuito digital. Facilita la depuración del programa y los análisis de fallas, ya que permite el seguimiento del flujo de datos. Es altamente reutilizable, permitiendo implementar un programa existente en otro proceso, realizando muy pocas modificaciones.

Figura 40. *Ejemplo lenguaje diagramas de bloques de funciones*

- *Esquema secuencial de Funciones (SFC):* Este tipo de lenguaje se originó en los años 70, llamado GRAFCET. Consiste en una secuencia estructurada de acciones las cuales están conectadas por eventos o cambios de estado. Se conforma básicamente por bloques de acción y pasos. Este programa es especialmente útil para programar secuencias de funcionamiento. Sin embargo, encontrar fallas en el funcionamiento del sistema se dificulta debido a la estructura de programación.

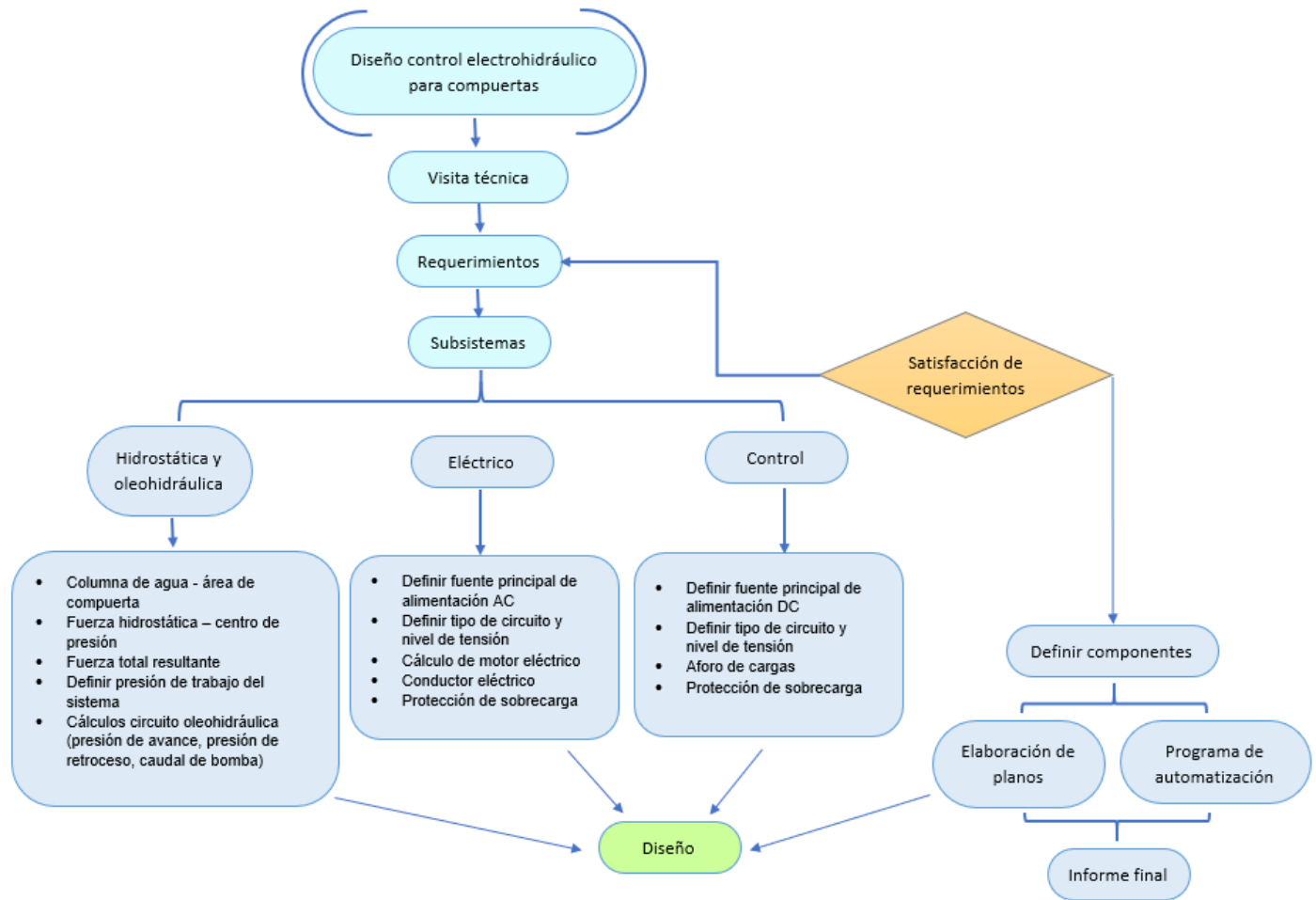
Figura 41. Ejemplo lenguaje esquema secuencial de funciones

4. Diseño metodológico

En el proyecto elaborado, la metodología aplicada está basada en el esquema representado en la figura 42, donde se muestra en forma de diagramas de bloques secuenciales el flujo de actividades realizadas durante la ejecución de este trabajo. Las actividades iniciaron con una visita técnica a la central Guanaquitas, donde se conoció su ubicación, las instalaciones, además se facilitó el acercamiento con el sistema de compuertas del desarenador, y se evaluaron los requerimientos que demanda el diseño. Los requerimientos conllevan a que se realice una subdivisión de sistemas en: hidrostático – oleohidráulico, eléctrico y control. En cada uno se evaluaron variables y se realizaron cálculos matemáticos que permitieron definir y seleccionar los componentes para cada subsistema. Con los componentes seleccionados, se elaboraron los planos y el programa

de automatización. De todo este proceso metodológico, se obtuvo como resultado el diseño del control electrohidráulico que se muestra en detalle en los anexos.

Figura 42. Esquema metodológico



Fuente: (elaboración propia 2022)

4.1 Fase 1. Determinación de los requerimientos para el diseño.

Para la determinación de los requerimientos, se realizó una revisión de los planos civiles y mecánicos asociados con el tanque desarenador y las compuertas de salida. Además, se verificó el estado físico y funcional de los componentes actuales. Con la revisión, se toma la decisión de dividir el sistema en tres subsistemas que de forma conveniente facilitaron el análisis, la selección de variables apropiadas y los cálculos matemáticos en cada uno. A continuación, detalles de los subsistemas y actividades relacionadas:

Subsistema de Hidrostático-Oleohidráulico.

Para el subsistema se identificaron las condiciones hidráulicas, las cuales se fundamentaron con la columna de agua que está dada por la altura del tanque, y las fuerzas asociadas a la interacción del fluido en la superficie de la compuerta. La fuerza hidrostática y el centro de presión se identificaron en primera instancia y se calcularon utilizando las variables mostradas en la tabla 4.

Tabla 4.

Variables para calcular la fuerza hidrostática y centro de presión

Variable	Símbolo	Unidades
Altura de compuerta	h	m
Ancho de compuerta	b	m
Densidad del agua con sedimentos	ρ	kg/m^3
Fuerza de gravedad	g	m/s^2

Nota. Datos obtenidos de la visita técnica en sitio.

Con las fuerzas que actúan sobre la compuerta al entrar en movimiento, se planteó el diagrama de cuerpo libre, con el que se obtuvieron las expresiones matemáticas para calcular la fuerza resultante que es requerida para izar la compuerta. A partir del resultado obtenido de la fuerza resultante, se inició el procedimiento para calcular el sistema oleohidráulico, teniendo en cuenta las siguientes variables: la presión de trabajo, el área

del vástago y cilindro, el diámetro el cilindro, caudales de avance y retroceso, potencia de la bomba, entre otras

Subsistema Eléctrico

En la zona de captación se identificó el tablero =NE50+NE51, que es la fuente principal de distribución de corriente alterna que alimenta las cargas eléctricas de los servicios existentes. Al revisar las características técnicas del tablero donde se consideraron las variables de corriente, nivel tensión, frecuencia, número de conductores etc., se elige como fuente apropiada para la alimentación eléctrica del sistema oleohidráulico. Con las variables antes mencionadas, se definió una instalación eléctrica trifásica pentafilear de baja tensión. A partir de esta consideración se realizaron los cálculos eléctricos del subsistema, entre los que se encuentran la potencia del motor, corriente nominal, calibre del conductor, protección de sobrecarga, etc. Lo siguiente es realizar el diseño en detalle del equipo cumpliendo con los requerimientos antes mencionados. Si el diseño cumple con estos requerimientos, se dará paso a la fase de ensamble de las piezas del equipo, de lo contrario habrá que reevaluar los requerimientos hasta llegar a un diseño final satisfactorio.

Subsistema de Control

Es un complemento del circuito eléctrico. En este proyecto en particular, se identificó en sitio la existencia del tablero =NE50+NE52, es la fuente principal de distribución de corriente directa que alimenta las cargas de los circuitos de control. Al revisar las características técnicas del tablero donde se consideraron las variables de corriente, nivel tensión, número de conductores etc., se elige como fuente apropiada para la alimentación del circuito de control para el sistema oleohidráulico. A partir de esta consideración, se realizaron los cálculos aplicando el método de aforo de cargas.

4.2 Fase 2. Definición de componentes y equipos.

A partir de los resultados obtenidos de los tres subsistemas mencionados anteriormente, se inició el proceso para definir los componentes para cada subsistema. El criterio de selección se basó en revisar y mantener la línea de marcas de los equipos que se utiliza en la central:

- En los circuitos eléctricos y de control se mantuvo la marca ABB para las protecciones y en los motores de manejo, la Marca SIEMENS.
- En la automatización se mantuvo la marca SIEMENS para el controlador lógico programable (PLC) y los módulos de entradas y salidas.
- En los componentes oleohidráulico se manejó la marca Rexroth Bosch Group para las electroválvulas, presostatos, bombas y depósito de aceite.
- Para los componentes menores se manejaron otras marcas de fácil consecución (Centelsa, SCHNEIDER, Dexson).

Los componentes se registraron en una lista especificando referencia, marca, etc. Esta información fue útil para continuar con la fase subsiguiente de proyección de planos.

4.3 Fase 3. Proyección de planos

Una vez definidos los componentes y equipos a utilizar, se elaboraron los planos oleohidráulico, eléctricos y de control.

Los planos eléctricos y de control se diseñaron con el software Autodesk AutoCAD 2020. Los esquemas oleohidráulicos se elaboraron con FluidSIM Hydro software de aplicación industrial, con el cual se inició el análisis del diseño en este proyecto. Los planos resultantes se entregan como evidencia del desarrollo del proyecto.

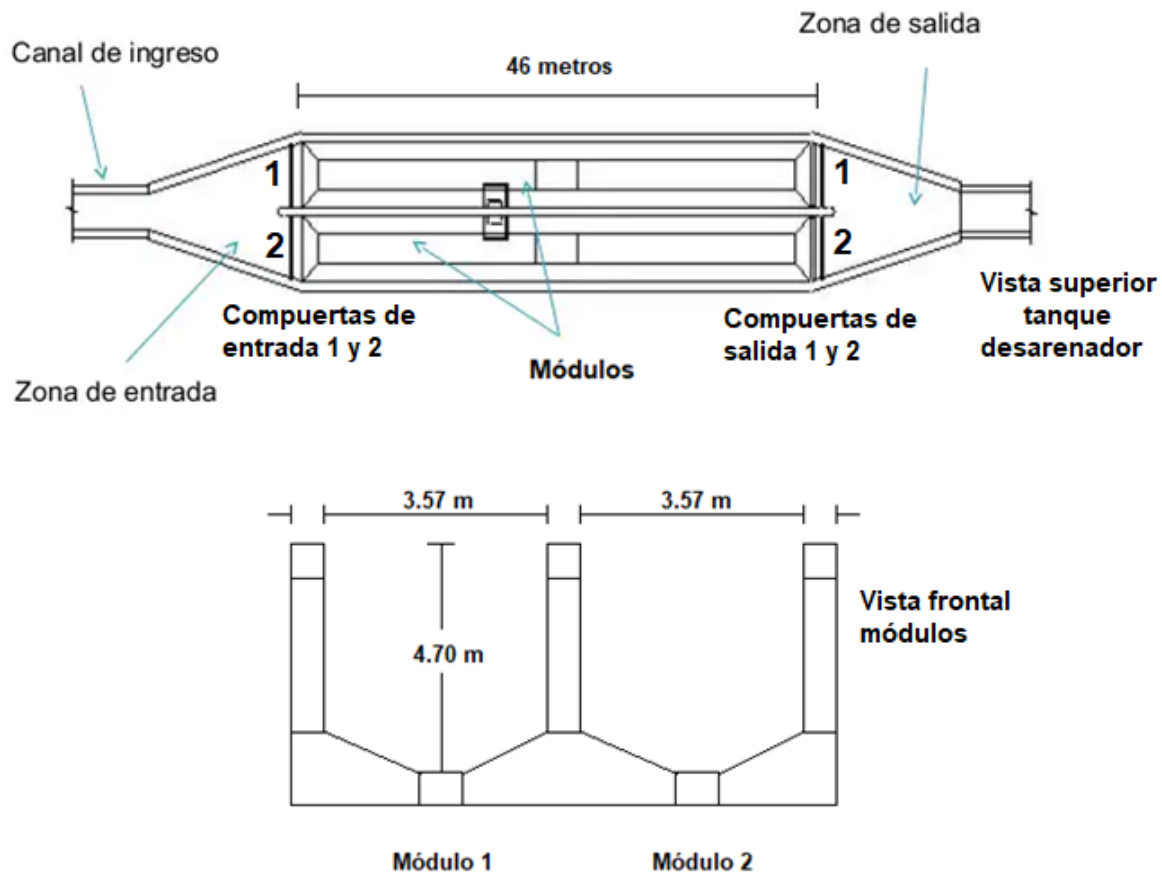
4.4 Fase 4. Desarrollo del programa de automatización.

Para este caso, se desarrolló el programa de automatización que define el funcionamiento de las compuertas, utilizando el software de SIEMENS TIA Portal V15.1 con un lenguaje de programación tipo escalera). El programa resultante no se entrega como evidencia ya que forma parte de los derechos de propiedad intelectual de la compañía ISAGEN S.A.S E.S.P.

5. Resultados y análisis

Para dar inicio a los cálculos de forma apropiada se ha considerado plasmar en este punto las dimensiones y consideraciones relevantes del tanque desarenador y las compuertas de salida. En la figura 43 se muestran las medidas del tanque, donde se puede observar que está compuesto por dos canales que tienen forma trapezoidal, de forma que se puede disponer de un módulo de respaldo para labores de mantenimiento. En la parte final están dispuestas las compuertas de salida que se identifican como: compuerta 1 - compuerta 2 y son indispensables para el lavado.

Figura 43. Dimensiones del tanque desarenador

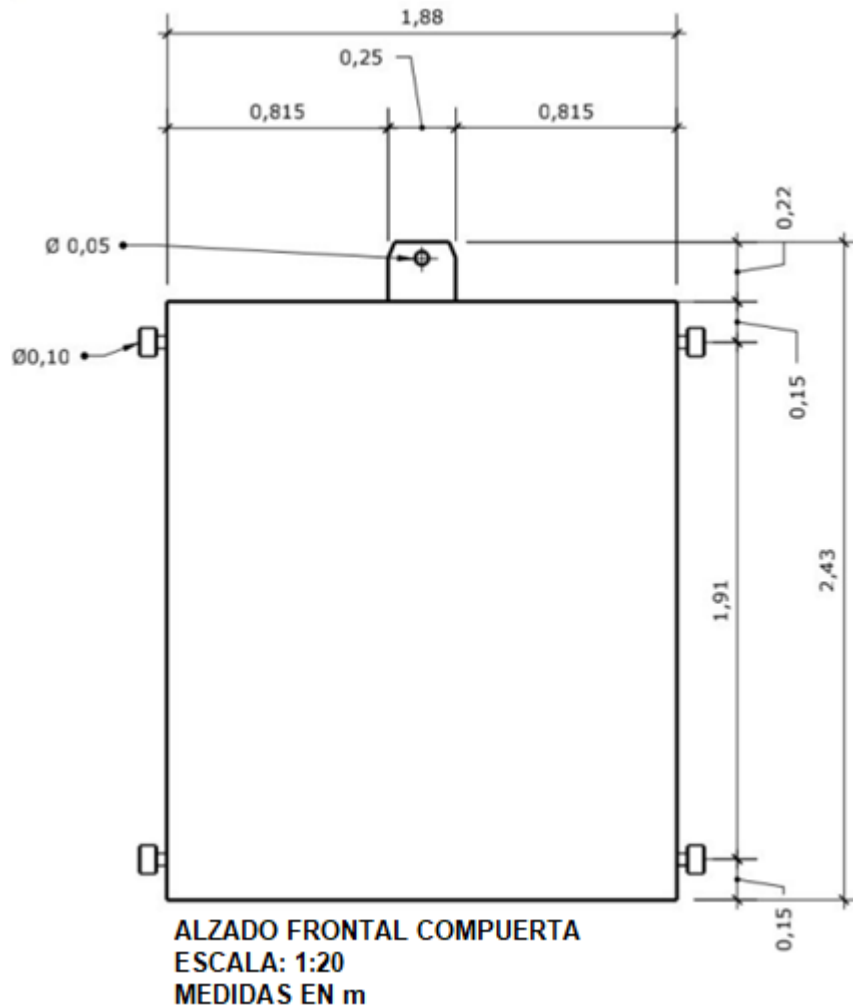


Fuente: (elaboración propia 2022)

Las compuertas son de tipo vagón deslizante, las cuales tienen cuatro ruedas guías (dos a cada lado) que se mueven al momento de levantar o bajar la compuerta. En la figura 44

se detallan las dimensiones de la compuerta y la ubicación de los rodillos, los cuales están fabricados en acero y tiene un diámetro de 0,10m. La compuerta se desliza sobre canales guías también fabricados en acero que entran en contacto con las ruedas. Para detalles dimensionales de la compuerta ver anexo 1. La compuerta y accesorios tienen una masa de 2000kg.

Figura 44. Vista frontal y dimensiones compuerta de salida desarenador



Fuente: (elaboración propia 2022)

5.1 Cálculos de diseño de subsistemas oleohidráulico, eléctrico y de control.

5.1.1 Cálculos de la fuerza hidrostática

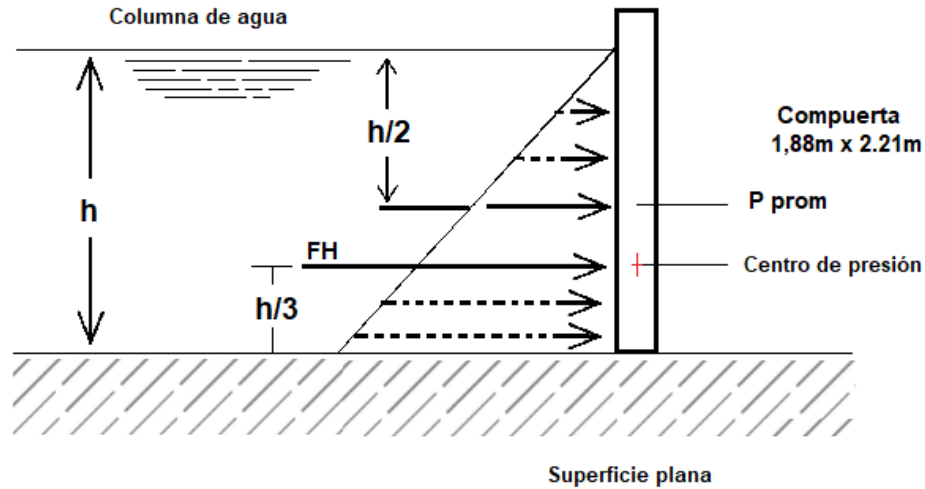
Los datos requeridos para el cálculo de la fuerza hidrostática y el centro de presión según la sección 3.6.3 se resumen en la tabla 5.

Tabla 5.

Variables para calcular la fuerza hidrostática

Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Altura de compuerta	H	m	2,21
Ancho de compuerta	B	m	1,88
Densidad del agua con sedimentos	ρ	kg/m^3	1120
Aceleración gravitacional	g	m/s^2	9,8

A continuación, en la figura 45, se representa el comportamiento de la fuerza hidrostática en la compuerta sumergida.

Figura 45. Columna de agua para calcular la fuerza hidrostática

Fuente: (elaboración propia 2022)

Tendremos el cálculo de la fuerza hidrostática en una superficie plana sumergida reemplazando los valores de las variables de la tabla 5 en la fórmula (6) por lo tanto se tiene:

$$|\vec{F}_H| = 1130 \text{ kg/m}^3 * 9,8 \text{ m/s}^2 (2,21 \text{ m}/2) * 4,1548 \text{ m}^2$$

$$|\vec{F}_H| = 50841,33 \text{ N}$$

Aplicando la fórmula (8) se calcula el centro de presión:

$$P_c = (2,21 \text{ m}/3)$$

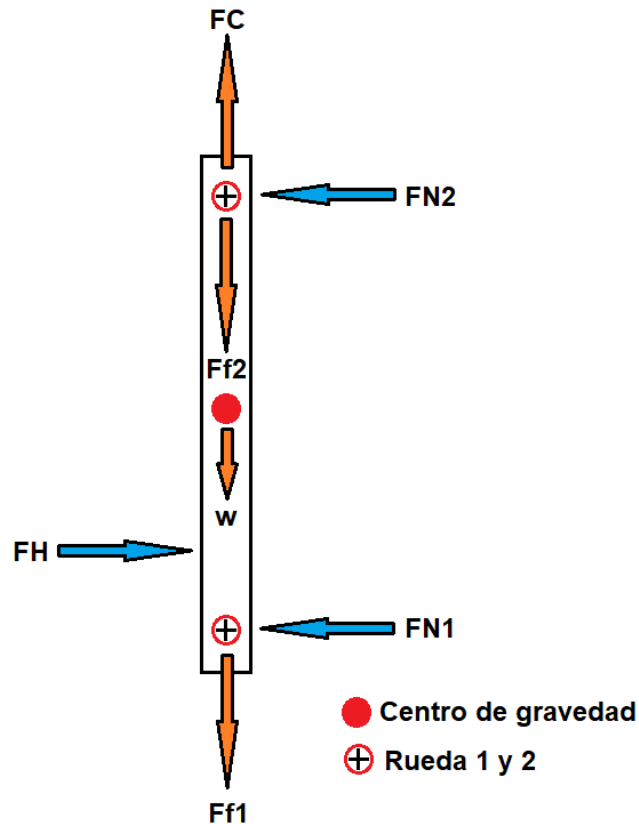
$$P_c = 0,736 \text{ m}$$

El centro de presión está ubicado a 0,736 m a partir de la base inferior de la compuerta, la fuerza hidrostática obtenida que se ejerce sobre el centro de presión corresponde al estar la compuerta sumergida a nivel de la columna de agua.

5.1.2 Cálculos de fuerza resultante requerida para levantar la compuerta

Al estar sumergida la compuerta, actúan varias fuerzas, en las que podemos encontrar F_H , F_{N1} , F_{N2} , W , etc. Para facilitar el análisis acorde a lo que se especifica en la sección 3.7.2, se plantea el diagrama de cuerpo de la figura 46.

Figura 46. Diagrama de cuerpo libre para el análisis de fuerzas



Fuente: (elaboración propia 2022)

En color azul, las fuerzas horizontales que actúan en la compuerta (eje x):

F_H : fuerza hidrostática generada por la columna de agua, que se concentra en el centro de presión, con un valor de 50841,33 N

F_{N1} : Fuerza normal 1. Actúa sobre la rueda 1 como reacción a la presión hidrostática (se debe calcular).

$FN2$: Fuerza normal 2. Actúa sobre la rueda 2 como reacción a la presión hidrostática (se debe calcular).

En color naranja las fuerzas verticales que actúan en la compuerta (eje y):

W : Peso de la compuerta, actúa sobre el centro de gravedad

$Ff1$: Fuerza de fricción en la rueda 1 opuesta al movimiento vertical

$Ff2$: Fuerza de fricción en la rueda 2 opuesta al movimiento vertical

FC : Fuerza del cilindro requerida para levantar la compuerta

Aplicando sumatoria de momentos respecto al punto de rotación de la rueda 1 ubicada en la parte inferior de compuerta tenemos:

$$\Sigma M_z = 0$$

$$-50841,33N * (0,586m) + 1,91m(FN2) = 0$$

$$-29793,02 Nm + 1,91m(FN2) = 0$$

$$FN2 = \frac{29793,02 Nm}{1,91m}$$

$$FN2 = 15598,4 N$$

Luego, se realiza sumatoria de fuerzas en la dirección horizontal tenemos:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$FN1 + FN2 = FH$$

$$FN1 = FH - FN2$$

$$FN1 = 50841,33 N - 15598,4 N$$

$$FN1 = 35242,93 N$$

La fuerza de fricción en las ruedas es proporcional a la fuerza normal que se ejercen en éstas y para calcularla se requiere el coeficiente de fricción estático del acero, que se obtiene según se indica en la tabla 1.

Fuerza de fricción en la rueda 1.

Aplicando la formula (10) se tiene el siguiente resultado:

$$Ff1 = 0.74 * 35242.93N$$

$$Ff1 = 26079,8 N$$

Fuerza de fricción en la rueda 2.

$$Ff2 = 0.74 * 15598,4N$$

$$Ff2 = 11542,8N$$

Para la Fuerza máxima o fuerza del cilindro que se requiere para el izaje de la compuerta, aplicaremos $\Sigma Fy = 0$, de donde se obtuvo la ecuación siguiente:

$$FC = W + Ff1 + Ff2$$

Al reemplazar valores tendremos:

$$FC = 19600N + 26079,8N + 11542,8N$$

$$FC = 57222,6 N$$

El resultado obtenido es la fuerza máxima que requiere el cilindro para mover la compuerta. Para generar el movimiento, el cilindro debe vencer el peso de compuerta y las dos fuerzas de fricción que dependen de las fuerzas normales ,que a su vez dependen de la fuerza hidrostática.

5.1.3 Cálculo del sistema oleohidráulico y condiciones de funcionamiento

El sistema está compuesto por dos compuertas ubicadas en la parte final del tanque identificadas de la siguiente manera, compuerta 1 y compuerta 2 (ver figura 43); cada una requiere de un cilindro para su accionamiento y se identificaron como cilindro 1 y 2, respectivamente.

Cálculos para los cilindros

Se tiene como requisito, que la fuerza requerida para accionar una compuerta de forma ascendente es de $57222,6 N = 5835,1 \text{ kg} - f$ y un desplazamiento de 2,50 m. Se define una presión hidráulica de trabajo de $124,1056 \text{ bar} = 18000 \text{ psi} = 126,59 \text{ kg-f/cm}^2$

Para calcular el área mínima efectiva de trabajo utilizamos la formula (11)

$$A_e = \frac{5835,1 \text{ kg} - f}{126,59 \text{ kg/cm}^2} = 46,1 \text{ cm}^2$$

Seleccionando un vástago de $\varnothing 50 \text{ mm}$ (5 cm), el área de este se calcula con la formula (12):

$$A_v = \frac{3,14}{4} * (5 \text{ cm})^2$$

$$A_v = 19,625 \text{ cm}^2$$

El área estimada de cámara del pistón se define con la fórmula (13):

$$A_{EP} = 46,1 \text{ cm}^2 + 19,625 \text{ cm}^2$$

$$A_{EP} = 65,725 \text{ cm}^2$$

El diámetro del pistón se calcula con la formula (14):

$$D_p = \sqrt{\frac{65,725 \text{ cm}^2}{0,7854}} = 9,15 \text{ cm}$$

Por condiciones comerciales de cilindros hidráulicos, se selecciona un pistón de diámetro interior de $\phi^{int} = 100 \text{ mm}$ (10cm). Con este diámetro comercial, el área de la cámara del pistón se define aplicando la formula (15).

$$A_p = 0,7854 * (10\text{cm})^2$$

$$A_p = 78.54 \text{ cm}^2$$

El área de la cámara del vástago se define con la formula (16):

$$A_{CV} = 0,7854[(10\text{cm})^2 - (5\text{cm})^2]$$

$$A_{CV} = 58.90 \text{ cm}^2$$

Con los resultados obtenidos se determina que es requerido por cada compuerta un cilindro con las dimensiones siguientes: 100mm de diámetro de pistón x 50mm de diámetro de vástago x 2500mm de carrera.

Cálculo de presiones de trabajo para los cilindros seleccionados.

La presión de trabajo definida inicialmente para el sistema y sus componentes es de 124.1056 bar = 18000 psi = 126, 59 kg-f/cm^2 Sin embargo, se debe calcular la presión mínima para los ciclos de avance y retroceso del cilindro 1 y 2.

Para calcular la presión de avance del cilindro (cerrar compuerta) se utiliza la formula (21):

$$P. \text{ Avance} = \frac{5835.1 \text{ kg} - \text{f}}{78.54 \text{ cm}^2} 74.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$P. \text{ Avance} = 74.3 \text{ kg/cm}^2 \cong 72.86 \text{ bar} \cong 1056.74 \text{ psi}$$

Para calcular la presión de retroceso del cilindro (Abrir compuerta) se utiliza la fórmula (22):

$$P. \text{ Retroceso} = \frac{5835.1 \text{ kg} - \text{f}}{53.54 \text{ cm}^2} 109 \text{ kg/cm}^2$$

$$P. \text{ Retroceso} = 109 \text{ kg/cm}^2 \cong 106.9 \text{ bar} \cong 1550.45 \text{ psi}$$

Cálculo de caudales de trabajo acorde al ciclo de avance y retroceso en cilindro 1 y 2.

Se ha definido la velocidad de avance para abrir y cerrar cada compuerta de $1\text{m}/\text{min} = 0,0166\text{ m/s}$. Se tiene una carrera del cilindro de $2500\text{ mm} = 2,5\text{ m}$

Caudal necesario para avance del cilindro.

$$Q.\text{avence} = 0,0166\text{m/s} * 78.54\text{ cm}^2 \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^2 = 1.30 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q.\text{avence} = 1.30 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s} \cong 7,8\text{ l}/\text{min}$$

Caudal necesario para retroceso del cilindro.

$$Q.\text{retroceso} = 0,0166\text{m/s} * 53.54\text{ cm}^2 \left(\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right)^2 = 8.89 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q.\text{retroceso} = 8.89 \times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s} \cong 5.33\text{ l}/\text{min}$$

Con los resultados obtenidos de los caudales en los ciclos de avance - retroceso y posibles pérdidas volumétricas en el sistema, consideraremos un caudal máximo de $10\text{ l}/\text{min}$.

$$Q\text{ max} = 10\text{ l}/\text{min}$$

Para el desplazamiento volumétrico de la bomba considerando un motor que gira a 1740 rpm , reemplazando valores en la formula (23), tenemos:

$$DV = \frac{53.54\text{ cm}^2 * 1\text{m}/\text{min} \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}\right)}{1740\text{ Rpm}}$$

$$DV = 3.18\text{ cm}^3/\text{rev} \cong 0.0318\text{ l}/\text{rev}$$

Para calcular la potencia de la bomba se requiere aplicar la expresión que se indica a continuación:

Potencia de la bomba:

$$W_{\text{bomba}} = \text{Max} (P.\text{retroceso} * Q.\text{retroceso}; P.\text{avance} * Q.\text{retroceso})$$

*P. avanca * Q. avance:*

$$74.3\text{ kg}/\text{cm}^2 \times \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}^2}\right)^2 \times \left(\frac{9.81\text{N}}{1\text{kg-f}}\right) \times 7,8\text{ l}/\text{min} \left(\frac{1\text{min}}{60\text{s}}\right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000\text{ lt}}\right) \times \left(\frac{1\text{Hp}}{746\text{ watt}}\right) = 1.3\text{ hp}$$

*P. retroceso * Q. retroceso:*

$$109 \text{ kg/cm}^2 \times \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}^2}\right)^2 \times \left(\frac{9.81\text{N}}{1\text{kg-f}}\right) \times 5.33 \text{ l/min} \left(\frac{1\text{min}}{60\text{s}}\right) \times \left(\frac{1\text{m}^3}{1000 \text{ lt}}\right) \times \left(\frac{1\text{Hp}}{746 \text{ watt}}\right) = 1.3 \text{ hp}$$

Los valores de los caudales en los ciclos de avance, retroceso y la potencia de la bomba determinan el tipo bomba a utilizar.

Potencia del motor eléctrico

Aplicando la formula (26) y un rendimiento del 80 % definido para el motor se tiene:

$$W_{\text{motor}} = \frac{W_{\text{bomba}}}{n_{\text{motor}}}$$

$$W_{\text{motor}} = \frac{2\text{Hp}}{0,8} = 2.5 \text{ Hp}$$

$$W_{\text{motor}} = 2.5 \text{ Hp}$$

Con los resultados obtenidos se demuestra que se requiere un motor de 2.5 Hp.

Siguiendo recomendaciones comerciales y revisando el catálogo de motores trifásicos de Siemens resulta favorable seleccionar un motor de 3 hp.

Depósito de aceite.

Para la selección del tanque o depósito de aceite tendremos en cuenta la siguiente expresión:

$$Volumen \text{ Dep.} = 3Q_{\text{max}}$$

$$Volumen \text{ Dep.} = 3(10\text{l/m})$$

$$Volumen \text{ Dep.} = 30\text{l}$$

Con el resultado obtenido se requiere un tanque de 30l.

5.1.4 Cálculos para circuitos eléctrico

Los cálculos se han realizado siguiendo los lineamientos de seguridad del reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) y La Norma NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano vigente. A continuación, se muestra el procedimiento para tal fin.

Para el desarrollo de este punto, es necesario conocer el emplazamiento específico de los equipos y características de la instalación eléctrica existente. En la zona de captación está instalado el tablero de distribución =NE50+NE51, que es el equipo que alimenta las cargas eléctricas de los servicios existente. Por ende, es la fuente principal para alimentar los motores y las cargas de la unidad oleohidráulica. A continuación, encontraremos la tabla 6 que registra los datos técnicos de la instalación eléctrica en la captación Guanaquitas.

Tabla 6.

Información técnica tablero =NE50+NE51

Referencia	MK-P	Año fabricación	
Vn	208 Vac	Fases	3
In	400	Hilos	5
Icc	10kA	Sn	2kVA
Fn	60Hz		
IP	55	Inst	interior

Nota: datos tomada de la ficha técnica del tablero de distribución en captación Guaquitas.
Fuente: (elaboración propia 2022)

Con estos datos, se define que es una instalación eléctrica trifásica pentafilear a un nivel de tensión de 208 Vac y funciona a una frecuencia de 60Hz. De esta instalación, se derivan los circuitos para las cargas menores que normalmente funcionan a 120 Vac. Para iniciar con los cálculos, debemos seleccionar la carga máxima de servicio continuo para el circuito; en nuestro caso corresponde al motor de 3hp definido anteriormente. Siguiendo recomendaciones comerciales y la línea de marcas de equipos que se utilizan en la central, se ha seleccionado un motor marca SIEMES, con las características apropiadas para la instalación eléctrica del lugar. En tabla 7 está registrada la información del motor de la marca seleccionada.

Tabla 7.

Datos técnicos de motor eléctrico

SIEMENS		3 motor 1LA7 90	
		3 hp / kW	S.S 1.15
	IP 55	Form. Cons	S1
	22 kg	208 / 410 Vac	Cl. Aisl.F
		9.9 / 4.2 A	60Hz
IEC34		Cos 0.8	1800 rpm

Nota. Fuente: (Elaboración propia 2022) información toma del catálogo de motores de Siemens 2021).

Potencia eléctrica del motor

Para calcular la potencia eléctrica, se requiere el dato de la potencia mecánica del motor seleccionado y su eficiencia, aplicando la fórmula (46) se tiene:

$$Pot. eléctrica = \frac{3 \text{ Hp} * \left(\frac{746 \text{ W}}{\text{Hp}}\right)}{0,8} = 2797,5 \text{ Watt}$$

$$Pot. eléctrica = 2797,5 \text{ Watt}$$

Velocidad sincrónica.

La velocidad sincrónica se obtuvo utilizando la expresión (47) como se especifica a continuación:

$$n_s = \frac{120 * 60 \text{ Hz}}{2 * 2} = 1800 \text{ rpm}$$

$$n_s = 1800 \text{ rpm}$$

Torque.

Para determinar el par o torque del motor se empleó la ecuación (48) obteniendo el siguiente resultado:

$$M = \frac{2797,5 \text{ Watt}}{1800\text{rpm} * 2\pi/60} = 14,8 \text{ Nm}$$

$$M = 14,8 \text{ Nm}$$

Corriente nominal del motor.

La corriente nominal a plena carga está basada en la potencia del motor y utilizando la ecuación (41) tendremos:

$$I \text{ nom.} = \frac{2797,5 \text{ w}}{\sqrt{3} * 208 \text{ v} * 0,8} = 9,7 \text{ A}$$

$$I \text{ nom.} = 9,7 \text{ A}$$

Se obtiene una corriente nominal de 9.7 A. Para el sistema planteado, se ha contemplado utilizar dos motores de iguales características, uno principal y otro de respaldo, por lo tanto, se tiene una corriente total para las cargas continuas de 19,4 A.

Protección contra sobrecargas del motor

La protección contra sobrecargas se denomina protección de máxima corriente, y se calcula aplicando la formula (49).

$$\text{Prot. sobre carga} = I \text{ nom} * 1.25$$

$$\text{Prot. sobre carga} = 9,7 \text{ A} * 1.25$$

$$\text{Prot. sobre carga} = 12.125 \text{ A}$$

El tamaño mínimo del dispositivo de protección contra sobrecarga es de 12.125 A. Este valor indicado por los cálculos no es comercial, por lo tanto, se debe utilizar una protección normalizada de 16 A. según lo indicado en la Artículo 240.6 (C) Tabla 240.6 (A). Norma NTC 2050.

Calibre del conductor alimentador del motor.

El valor de corriente nominal del motor encontrada mediante el cálculo manual es de 9.7 A, pero a esta corriente se le debe aplicar el factor de 1.25, utilizando la formula (49) tenemos:

$$Cal. conductor = I_{nom} * 1.25$$

$$Cal. conductor = 9,7 A * 1.25 = 12.125 A$$

$$Cal. conductor = 12.125 A$$

Se obtiene el valor de 12.125 A.

De acuerdo a la tabla 310.15 (B) (16) del código eléctrico colombiano NTC 2050, el tamaño del conductor de cobre requerido es de 2.08 mm (14 AWG); para la aplicación de circuito trifásico tetrafilar, se requiere el conductor 4 x 14 AWG. También se tienen en cuenta las recomendaciones para las limitaciones de protección contra sobre corrientes del conductor indicadas en Artículo 240.4 (D) (3) aplicado en conductores pequeños.

Otras cargas asociadas al circuito.

Son cargas menores o cargas no continuas que complementan el sistema, de las cuales se destacan en este caso:

- *Iluminación de caseta oleohidráulica*

El código eléctrico Colombiano NTC 2050 en el capítulo 2, artículo 220, Tabla 210.12. define la carga de iluminación general por tipo de área. Para el caso de este proyecto, se contempló una caseta (Cuarto) para ubicar los equipos del accionamiento para las compuertas que tiene un área estimada de $9 m^2$. Aplicando lo definido en la Tabla 210.12 de la NTC 2050 tenemos:

$$\text{Carga alumbrado general: } 9m^2 * (33 VA/m^2) = 297 VA$$

El valor de la tensión para el circuito de iluminación es de 120 Vac, por lo tanto, tenemos:

$$\text{Carga alumbrado general: } 297 VA \div 120 V = 2.475 A$$

El valor obtenido de la corriente es bajo y los circuitos de iluminación son propensos a ser expandidos. Por lo que se ha definido las características siguientes del circuito de iluminación:

Circuito monofásico – trifilar a 120 vac, con una protección de 16 A y cable calibre 3 x 14 AWG THWN.

- *Toma corrientes caseta*

Para un tomacorriente convencional se especifica una potencia de 180 VA y un nivel de tensión de 120 Vac. En la instalación se consideran 2 unidades de tomacorrientes, por lo que tenemos lo siguiente:

Carga general tomacorrientes: $Cant. t. corrientes * Carga Unid. t. corriente$

Carga general tomacorrientes: $2 * 180 VA = 360 VA$

$$2 * 180 VA = 360 VA$$

$$360VA \div 120 Vca = 3 A$$

En la Tabla 210 – 21(B)(2) del capítulo 2 de la NTC 2050 se define la carga máxima para un tomacorriente a partir del valor nominal del circuito (A). Por lo tanto, con la carga asociada al circuito de tomacorrientes se define: Circuito monofásico – trifilar a 120 vac, con una protección de 16 A y cable calibre 3 x 12 AWG THWN.

- *Calefacción, iluminación y toma tablero eléctrico.*

Algunos de los requisitos generales al diseñar tableros eléctricos es acondicionar el interior. Se recomienda instalar un circuito de calefacción, iluminación y toma corriente. A continuación, en la tabla 8 se muestran los datos de tensión, potencia y los cálculos de corriente de los elementos de la instalación:

Tabla 8.

Cálculos de corriente de los elementos

Descripción de la carga	Tensión de operación (Vac)	Potencia (VA)	Corriente (A)
Tomacorriente	120	180	180/120 = 0.66

Iluminación	120	100	$100/120 = 1.5$
Calefacción	120	100	$100/120 = 0.83$

Con datos de corrientes obtenidos de la tabla anterior y el nivel de tensión podemos definir lo siguiente: Circuito monofásico – trifilar a 120 vac, con una protección de 16 A y cable calibre 3 x 12 AWG THWN.

Calculo para la protección principal circuito alimentador.

Los datos requeridos para calcular la protección principal se resumen en la tabla 9, donde se clasifican las cargas continuas y no continuas para el sistema oleohidráulico.

Tabla 9.

Clasificación de cargas

Tipo de carga	Descripción	Cantidad	Corriente – protección (A)
Cargas continuas	Motor trifásico 3hp	2	19.4
Cargas no continuas	Iluminación caseta	1	16
	Toma corrientes caseta	2	16
	Calefacción, iluminación y toma tablero caseta oleohidráulica	1	16
	Caja Multi-tomas	1	20

Para calcular la protección principal utilizaremos la siguiente expresión:

$$Prot. princ. = (Cargas continuas * 1,25) + (Cargas no continuas * 0,35)$$

$$Prot. princ. = (19.4 A * 1.25) + (68 A * 0.35)$$

$$Prot. princ. = 24.25 A + 23,8 A$$

$$Prot. princ. = 48,05 A$$

El tamaño mínimo del dispositivo de protección contra sobrecarga es de 48.05 A. Este valor indicado por los cálculos no es comercial, por lo tanto, se debe utilizar una protección normalizada de 50 A. Según lo indicado en la Artículo 240.6 (C), Tabla 240.6 (A).

Calibre del conductor alimentador principal.

El circuito alimentador principal tendrá tres conductores portadores de corriente, un conductor neutro y uno de puesta a tierra, para un total de cinco cables. Con la capacidad de corriente de la protección normalizada de 50 A y acudiendo a la tabla la tabla 310.15 (B) (16), del código eléctrico colombiano NTC 2050, se tiene lo siguiente:

$$Prot. \text{ princ. normalizada} = 50 \text{ A}$$

Con el valor indicado de la corriente, el conductor requerido es:

$$Cal. \text{ conductor} = 6 \text{ AWG}$$

Teniendo presente el tipo de circuito tenemos el conductor:

$$C. \text{ trifásico pentafilear} = 5 \times 6 \text{ AWG THWN}$$

La selección del calibre del conductor se realizó según lo indicado en el artículo 215.2 (A)(1) del código eléctrico colombiano NTC 2050.

5.1.5 Cálculos para circuito de control

Con el análisis previo de los requerimientos, se determinó un estimado de los componentes de control y cantidades a utilizar. Esto conlleva a realizar el aforo de cargas, siendo éste el método útil para los cálculos aplicados en este punto. A continuación, se ilustra la tabla 10 que contiene la información de los componentes y su capacidad nominal. En captación se cuenta con el tablero =NE50+NE52 para la distribución de los circuitos de corriente directa, por ende, es la fuente principal para la alimentación del circuito de control.

Tabla 10.

Aforo de cargas componentes circuito de control

Descripción componentes	Características	Cant	Carga
Fuente de alimentación DC	Entrada: 100-240 vcc – 4-2 ^a Salida: 24 vcc 10 A	1	10A
Relés electromecánicos	Alimentación de bobina CA, 1,2 VA (50 Hz); CC estándar 650 mW; CC sensible 500 mW; 2 contactos CO clasificados de 10 A.	10	0,3A
PLC – CPU	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal 500 mA	1	0,5A
Módulos de entrada digitales (16 input)	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal por entrada 4mA	1	0,064A
Módulos de salidas digitales (16 output)	Tensión de alimentación: 24 vdc Consumo nominal por salida 4mA	1	0,064A
Periféricos			
Electroválvulas	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal 1.29 A	6	12,9A
Presostatos	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal 20mA	7	0,14A
Indicador luminoso (pilotos)	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal 10 mA	10	0,1A
Sensores inductivos	Tensión de alimentación: 24 vcc Consumo nominal 200 mA	6	1,2A
Corriente total de cargas			25.3 A

Con el aforo de carga de la tabla 10 se definen tres circuitos y sus respectivas protecciones, los cuales se listan en la tabla 11.

Tabla 11.

Circuitos de control

Circuito	Descripción	Protección
1	Alimentación 125 Vcc, fuente 125/24 Vcc	10 A
2	Alimentación 24 Vcc, PLC – CPU y electroválvulas	6A
3	Alimentación 24 Vcc, módulo de entrada, módulos salida, relés electromecánicos	6A

El circuito 1 corresponde a las cargas continuas y los circuitos 2 y 3 corresponden a las cargas no continuas.

5.2 Componentes oleohidráulicos, eléctricos y de control

Con base en los cálculos anteriormente presentados, se seleccionaron los componentes correspondientes a cada subsistema (oleohidráulico, eléctrico y control), como se muestra en las tablas 12, 13 y 14, donde se especifican nombre técnico, referencia, marca y cantidades. Para la selección de los elementos y componentes se tuvo como condición mantener la línea de las marcas de los equipos que se utiliza en la central.

Tabla 12.

Componentes y elementos sistema oleohidráulico

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	MARCA
1	1 unid	Tanque o depósito de aceite	Rexroth
2	1 unid	Visor de nivel	Rexroth
3	1 unid	Válvula para drenaje de tanque	Rexroth
4	1 unid	Sensor de bajo nivel de aceite	Rexroth
5	1 unid	Tapa filtro de llenado	Rexroth
6	2 unid	Filtro de succión	Rexroth
7	2 unid	Bomba hidráulica de caudal variable compensado por presión	Rexroth
8	2 unid	Motor eléctrico 3 HP a 1800 rpm	SIEMENS
9	2 unid	Campana de montajes	Rexroth
10	2 unid	Acople flexible	Rexroth
11	unid	Válvula de seguridad	Rexroth
12	unid	Válvula antirretorno	Rexroth
13	unid	Manómetro 0-250 Bar	OMT
14	1 unid	Válvula ON-OFF para venteo de bombas	OMT
15	2 unid	Válvula ON-OFF para cargar acumulador	Rexroth
16	1 unid	Presostato de alta presión	Rexroth
17	1 unid	Presostato de baja presión	Rexroth
18	1 unid	Acumular hidráulico	Rexroth
19	unid	Válvula de control de flujo compensador de presión	Rexroth
20	1 unid	Filtro de retorno 50 AT con indicador de obstrucción	Rexroth
21	1 unid	Sensor de obstrucción	Rexroth
22	2 unid	Electroválvulas direccionales centro cerrado a 24Vcc para accionamiento de cilindros	Rexroth

23	unid	Válvula control de flujo con check	Rexroth
24	unid	Válvula antirretorno dobles pilotadas internamente	Rexroth
25	2 unid	Cilindro hidráulico de doble efecto (100mm x 50mm x 2500mm)	Rexroth
26	1 unid	Bomba manual	Rexroth

Tabla 13.

Componentes y elementos circuito eléctrico

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MARCA
1	1 unid	Tablero eléctrico 80cm x 60cm x 30 cm	Mod: R5CE1083 IP66	DKC
2	1 unid	Interruptor automático 3P-C-50A	S203 C50	ABB
3		Interruptor automático 3P-C-40A	S203 C40	ABB
4	2 unid	Interruptor automático 3P-C-20A	S203 C20	ABB
5	4 unid	Interruptor automático 1P-C-16A	S201 C16	ABB
6	2 unid	Interruptor automático 1P-C-10A	S201 C10	ABB
7	2 unid	Interruptor automático 1P-C-6A	S201 C6	ABB
8	2 unid	Guarda motor	S201 C6	ABB
9	1 unid	Termostato mecánico 0-60°C	AC250V 10(2)A	KTO
10	1 unid	Resistencia de calefacción 100Watt 110 – 250V	NTR1-100	CHIT
11	1 unid	Tomacorriente 16A	EO-AB/UT/LED/16	PHOENIX CONTACT
12	10 m	Cable encauchetado 4x8 AWG	THHWN	CENTElsa
13	20 m	Cable encauchetado 4x12 AWG	THHWN	CENTElsa
14	10 m	Cable encauchetado 4x14 AWG	THHWN	CENTElsa
15	100 m	Cable de monopolar 16 AWG	THHWN	CENTElsa

Tabla 14.

Componentes y elementos circuito de control.

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	MARCA
1	1 unid	PLC SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/RLY	6ES7214-1HG31-0XB0.	SIEMENS
2	1 unid	Módulo de entradas digitales SM 1221, 16 DI, DC 24V,	6ES7221-1BH32-0XB0	SIEMENS
3	1 unid	Módulo Digital I/O SM 1223, 8 DI/8 DO, 8 DI 24 V DC	6ES7223-1PH32-0XB0	SIEMENS
4	1 unid	Fuente de alimentación 110 Vcc – 24vcc	CP M SNT 250W 24V 10A	Weidmuller
5	1 unid	Interruptor automático 2P-C-10A	S202 C10	ABB
6	3 unid	Interruptor automático 2P-C-6A	S202 C6	ABB
7	10 unid	Relé electromecánico 2 contactos 8A – Bobina 24Vcc	PCB/Plug-in Type 40.52	Finder
8	6 unid	Piloto compacto, LED incluido, IP65 24V AC/DC Color rojo	A22-LCLED24-R	Laumayer

9	3 unid	Selector negro, 2 posiciones fijas - NA	XB4BD21	SCHNEIDER
10	10 unid	Bloque de contacto: 22mm, 1NO, 10A,600V AC DC	ZBE-101	SCHNEIDER
11	10 unid	Bloque de contacto: 22mm, 1NC, 10A,600V AC DC	ZBE-102	SCHNEIDER
12	2 unid	Botón pulsador iluminado led verde, 24V CA/CC, LED, 1NA/NC	XB4BW33B5	SCHNEIDER
13	2 unid	Botón pulsador iluminado led rojo, 24V CA/CC, LED, 1NA/NC	XB4BW34B5	SCHNEIDER
14	1 unid	Pulsador de parada de emergencia, tamaño de 22 mm, giro para liberar, color rojo	XB4BS8442	SCHNEIDER
15	1 unid	Termostato mecánico 0-60°C	AC250V 10(2)A	KTO
16	1 unid	Resistencia de calefacción 100Watt 110 – 250V	NTR1-100	CHIT

17	10 unid	Borne conexión de tornillo, 4 mm ² , 500V, 32 A,	WDU 4N	Weidmuller
18	5 unid	Conector cruzado (Puente 2) 32 A	ZQV 4N/2	Weidmuller
19	40 unid	Borne Terminal de prueba-desconexión, Conexión de tornillo, 4 mm ² , 500 V, 32 A	WTR 4	Weidmuller
20	50 unid	Borne, conexión de tornillo, 4 mm ² , 800 V, 32 A	WDU 4	Weidmuller
21	2 unid	Conector cruzado (Puente 10) 32 A	ZQV 2.5N/10	Weidmuller
22	1000 unid	Terminales tubulares con aislamiento	H1,5/14	Weidmuller
23	3 unid	Canaleta ranurada gris 60 x 60 2m	077DEX009	Dexson

5.3 Planos oleohidráulicos, eléctricos y de control

A partir de la información de la tabla 12, se realizó el diagrama oleohidráulico utilizando el software FluidSIM hydro (Anexo 2). En los planos se representa gráficamente la instalación oleohidráulica, además de las interconexiones y componentes o dispositivos utilizados.

A partir de la información de la tabla 13, se realizaron los planos del circuito de potencia y del tablero, donde se puede observar la identificación y ubicación de los componentes

(Anexo 3 y 4). En los planos, se representa gráficamente la instalación, además de las interconexiones y materiales o dispositivos utilizados.

A partir de la información de la tabla 14, se realizaron los planos del circuito de control y del tablero, donde se puede observar la identificación y ubicación de los componentes (Anexo 5 y 6). En los planos se representa gráficamente la instalación, además de las interconexiones y materiales o dispositivos utilizados.

5.4 Desarrollo de software de automatización

La guía del programa de automatización desarrollado se muestra en el Anexo 7. Se recuerda que este programa no se entrega como parte de la evidencia por ser propiedad intelectual de la compañía.

A. Anexos

A continuación, se encuentran los documentos o elementos que complementan el cuerpo del trabajo y que se relacionan, directa o indirectamente, con elaboración del diseño:

Anexo 1. Compuertas levantamiento dimensional

Anexo 2. Plano circuito oleohidráulico

Anexo 3. Planos eléctricos circuito de potencia

Anexo 4. Tablero circuito de potencia

Anexo 5. Planos circuito de control compuertas

Anexo 6. Tablero circuito de control

Anexo 7. Guía de desarrollo de programa de automatización.

6. Conclusiones

De acuerdo con las condiciones expuestas y los resultados obtenidos que se exponen en este documento, se concluye lo siguiente:

- El diseño entrega como resultado los cálculos necesarios de los subsistemas oleohidráulico, eléctrico y control para realizar un sistema de control para las compuertas del tanque desarenador.
- Las características técnicas que se requieren para que el sistema oleohidráulico pueda accionar la compuerta son una fuerza de izaje de 5.8 ton, con una velocidad de 1m/min, tiempo de izaje de la compuerta de 2 minutos. Se requiere un cilindro hidráulico de 100 x 50 x 2500 mm y que soporte una presión de trabajo de 124 bar. La unidad oleohidráulica debe tener las siguientes características: motor eléctrico de potencia 3 HP, velocidad 1800 rpm, Bomba oleohidráulica de caudal variable de 10 litros/ minuto, presión nominal de trabajo 124 bar, capacidad del tanque hidráulico de 30 Litros.
- La selección de los componentes se basó en el principio de mantener la línea de marcas de los equipos que se utiliza en la central y el cumplimiento de los criterios técnicos acordes a la presente aplicación.
- Para realizar un diseño de una instalación eléctrica de cualquier índole es importante tener claros los conceptos en las diferentes teorías de electricidad, pero es de suma importancia siempre tener presente la aplicación de la norma técnica RETIE y la norma técnica Colombiana NTC 2050, debido a que además de la calidad de los equipos y las instalaciones, éstas velan por la seguridad de las personas.

7. Bibliografía

- Alonzo Vásquez, A. W. (2013). *MEDICIÓN DE FLUJO EN COMPUERTAS Y ORIFICIOS*. Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3590_C.pdf
- ARRIETA, R., & GONZALEZ KERGUELEN, F. (2003). *TUTORIAL BASICO PARA PROGRAMACIÓN DE PLC*. TESIS DE GRADO , UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR, BOLIVAR, CARTAGENA. Recuperado el 8 de 2022, de <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/3596/0024806.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Erbisti, P. C. (2004). *Design of Hydraulic Gates* (2da ed.).
- GRUPO DE INVESTIGACION XUÉ SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN BARIÓN. (2020). *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE*. (A. Escobar Díaz, Editor, & P. C. (PCH'S), Productor) Recuperado el 08 de 2022, de UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE: <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/Pequen%CC%83as-Centrales-Hidroele%CC%81ctricas.pdf>
- Moreno Morales, T. C. (2019). *Propuesta de metodología para programación de plc en lenguaje ladder*. Universidad Privada Antenor Orrego - UPAO. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12759/4749>
- Naudascher, E. (1991). *Flow-induced forces and vibrations-toward safer design in hydraulic and wind engineering*.
- Osorio Londoño, I. (2017). *Universidad EAFIT*. Recuperado el 15 de 07 de 2022, de Universidad EAFIT: <http://hdl.handle.net/10784/11732>
- Rodriguez García, D. (2017). *neración de código IEC-61131-3 multiplataforma para sistemas de almacenaje automático*. UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Obtenido de https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43549/TFM_DiegoRodriguezGarcia.pdf?sequence=7
- Segura Usuriaga, J. (2019). *Universidad Continental*. (E. d. Central, Productor) Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/7032/2/IV_FIN_109_Segura_Usuriaga_2019.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2015). *POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA. ATLAS*, 15. Recuperado el 08 de 2022, de https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p1-24.pdf

Definición de lenguajes de programación para PLC, Tomado el 14 de octubre del 2013.

[URL:http://infoplc.net/files/documentacion/automatas/infoPLC_net_lenguajes_programacion_V4.pdf](http://infoplc.net/files/documentacion/automatas/infoPLC_net_lenguajes_programacion_V4.pdf)

FI-UNLP, (2013) Instrumentación y Comunicaciones Industriales: Diagrama de contactos (Ladder)

ICONTEC (2020), Norma Técnica Colombiana NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano. República De Colombia Ministerio De Desarrollo Económico

Ministerio de Minas y Energías, Reglamentos Técnicos. Tomado 10 de marzo de 2013.

URL:http://www.minminas.gov.co/minminas/energia.jsp?cargaHome=3&id_categoria=770&id_categoria=157

Promelsa, Tableros de distribución de baja tensión, 2013, tomado el 10 de octubre de 2013.

URL: <http://www.promelsa.com.pe/tableros-distribucion.htm>

Schneider Electric (2013), Catálogo de productos distribución eléctrica 2011, Products Data Sheet.

WEG, Paneles Eléctricos. Tomado 11 de marzo de 2013 .URL:

<http://www.weg.net/mx/Productos-y-Servicios/Paneles-Elctricos/Panel-Elctrico/Centro-de-Control-de-Motores-de-Media-Tension-CCM-aUs-MT>

Khederzadeh M, (2011), Mechanical Protection of Induction Motors by Off-the-Shelf Electrical Protective Relay

Calán, c. (2019). Diseño e implementación de un sistema de control supervisorio en plataformas web de controladores s7-1500 simatic de siemens, para la empresa ingel-pro. Quito: bibdigital.epn.edu.ec

Gimenez, A. (2019). Proyecto de automatización de una línea de producción de engranajes mediante autómatas S7-1200 y HMI KTP700 basic de Siemens. Riunet.upv.es.

