

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



O&M Eléctrica Matamoros.

**Diseño para automatización y optimización de la toma de agua de la Central
Hidroeléctrica Platanar.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

Leonardo Cardinale Villalobos

Cartago, Junio del 2011

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Marvin Hernández Cisneros

Profesor lector



Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector



Ing. Eduardo Interiano Salguero

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 22 de Junio de 2011

Declaro que el presente anteproyecto ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 14-6-11



Leonardo Cardinale Villalobos

Céd: 206360220.

Resumen

La empresa O&M Eléctrica Matamoros S.A es una empresa dedicada a la generación de energía eléctrica desde el año 1932, además ofrece servicios de operación y mantenimiento de centrales hidroeléctricas.

La toma de agua de este proyecto hidroeléctrico se ubica en Dulce Nombre de Ciudad Quesada en el río Platanar; a partir de ahí se lleva el agua por un canal de 3450 m hasta el sitio del embalse para su posterior uso en la generación de energía.

La toma de agua opera de forma manual, esto quiere decir que las compuertas las acciona un operario girando una manivela, no posee limpia rejás ni tampoco dispositivos de medición de variables como: niveles de agua o porcentaje de apertura de las compuertas.

Por la gran importancia del agua en la actualidad, el proyecto hidroeléctrico busca siempre aprovechar al máximo este recurso que obtiene del río, sin embargo las condiciones de la toma hacen que durante avenidas se aproveche de forma ineficiente.

Los grandes beneficios que brinda la automatización en la actualidad despertaron el interés de optimizar y automatizar la toma de agua de la central hidroeléctrica.

Este proyecto consiste en un diseño para la automatización y optimización de la toma de agua. Se diseñó un mecanismo de apertura y cierre de las compuertas de descarga de fondo y desarenador, además se obtuvo un modelo de la planta para detectar una avenida y una obstrucción de la reja. Por medio de un PLC se diseñó la lógica para controlar las compuertas y accionar un limpiarrejas, según la información que brinda el modelo a partir de sensores de nivel de agua.

Palabras clave: Toma de agua, automatismo, compuerta radial, PLC, control de avenidas.

Abstract.

O&M Eléctrica Matamoros SA is a company dedicated to the generated electricity since 1932 and offers services of operation and maintenance of hydropower plants.

The water intake of this project is located in Dulce Nombre of Ciudad Quesada in Platanar River; from there the water is carried by a channel of 3450m to the reservoir site.

The intake operates fully manual, this means that the gates are operated by an employee by turning a crank, has no bar screen cleaner nor measuring devices for parameters as: water level or percent of opening for the gates.

Because of the importance of the water in the actuality, the hydroelectric project always seeks the maximum use of the river resource, however the water intake conditions makes very inefficient the use of the water during floods.

The major benefits provided by automation have attracted the interest of modernizing the water intake of the Platanar hydroelectric plant.

This project is a design to modernize and automate the water intake. It has been design an opening and closing mechanism for bottom discharge gate and the sand trap gate, also has been obtained a model of the plant to detect a flood and a obstruction of the bar screen. A control logic was designed to operate the gates and the bar screen cleaner by a PLC, according to the information collected by the model through level sensors.

Keywords: water intake, automatism, radial gate, PLC, flood control.

Dedicatoria.

Dedico este proyecto de graduación a Dios, le doy gracias por haberme permitido vivir esta experiencia y ayudarme en los momentos más difíciles. Aunque a veces tuve algunos tropiezos en el camino, al final todo resultó ser para bien.

A mis padres, Leonardo Cardinale Villagrán y Marleny Villalobos Jiménez, ellos me apoyaron a cumplir todas mis metas y confiaron en las decisiones que tomé. Todo lo que soy es gracias a ellos que me han formado y aconsejado durante toda mi vida.

A mis compañeros de estudio, sin ellos no hubiera podido superar todas las dificultades que se presentaron en cada curso de la carrera.

Agradecimiento.

Le agradezco a todo el departamento técnico de O&M Eléctrica Matamoros, especialmente a Gerardo Salazar Barbosa por haberme ayudado y permitido realizar este proyecto, además a la división de predictivo porque me aceptó y aconsejó en el desarrollo de esta etapa.

En general a todos los que laboran en las oficinas centrales de la empresa porque formaron un ambiente de trabajo muy agradable y me apoyaron todos los días durante el proyecto.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Problema existente e importancia de la solución.....	1
1.2 Solución seleccionada.....	3
Capítulo 2: Meta y objetivos.....	4
2.1 Meta.....	4
2.2 Objetivo general.....	4
2.3 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 3: Marco teórico.....	5
3.1 Descripción de la función y operación de la toma de agua.....	5
3.2 Tecnología aplicable en las centrales hidroeléctricas.....	9
3.2.1 Limpiarrejas.....	10
3.2.2 PLC.....	11
3.2.3 Sensores para procesos industriales.....	13
3.2.4 Sensores analógicos de nivel.....	14
3.2.5 Compuerta tipo taintor.....	15
3.3 Principios físicos y matemáticos considerados para la solución.....	17
3.3.1 Fuerzas sobre una superficie curva sumergida.....	17
3.3.2 Caudal en un canal abierto.....	20
3.3.3 Cilindros hidráulicos.....	22
3.3.4 Lógica difusa.....	24
Capítulo 4: Metodología.....	28
4.1 Reconocimiento del problema en la toma de agua.....	28
4.2 Obtención y análisis de la información.....	29
4.3 Selección y verificación de la solución.....	29
4.4 Posibilidades que brinda la solución en el futuro.....	31
Capítulo 5: Diseño realizado.....	32
5.1 Análisis de la solución.....	32

5.1.1	Modelo de la toma de agua.....	32
5.1.2	Etapa de recolección de información para el modelo.....	34
5.1.3	Lógica de control de la toma de agua.	34
5.1.4	Etapa de accionamiento de las compuertas.....	35
5.1.5	Programa para el PLC.....	36
5.1.6	Solución final.....	38
5.1.7	Beneficios económicos de la solución.....	39
5.2	Diseño de la solución.....	44
5.2.1	Obtención de un modelo de la toma de agua.....	44
5.2.2	Etapa de recolección de información para el modelo.....	50
5.2.3	Lógica de control de la toma de agua.	61
5.2.4	Etapa de accionamiento de las compuertas.....	75
5.2.5	Programa para PLC.	98
Capítulo 6:	Análisis de resultados.	115
Capítulo 7:	Conclusiones y recomendaciones.....	118
7.1	Conclusiones.	118
7.2	Recomendaciones	118
Capítulo 8:	Bibliografía.	119
Apéndices y anexos		121
A.1	Glosario, abreviaturas y simbología.....	121
A.2	Procedimiento para controlar la toma de agua en modo manual.....	121
A.3	Descripción de las entradas y salidas del PLC.	123
A.4	Constantes utilizadas en el programa del PLC.	125
A.5	Modificar el valor de alguna constante en la rutina <i>InicializarConst</i>	127
A.6	Habilitar el filtrado en las entradas del módulo EM 231.	127
A.7	Conexión de las salidas al PLC.	128
A.8	Conexión de un sensor digital al PLC	129
A.9	Conexión de entradas y salidas al PLC	130
A.10	Variables utilizadas en el programa del PLC.	130
A.11	Unidad de mando y señalización.	132
A.12	Fuente de CD del PLC.....	132
A.13	Contactos para adquirir la mayoría de componentes necesarios para el proyecto.	133

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Manivela para abrir la compuerta R1.	2
Figura 1.2. Reja hacia el desarenador.	2
Figura 3.1. Diagrama de una vista superior de la toma de agua.....	6
Figura 3.2. Toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar; a la izquierda se aprecia el desarenador.	7
Figura 3.3. Interior de la toma de agua.	8
Figura 3.4. Entrada de la toma de agua.....	8
Figura 3.5. Procedimiento para operar la toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar.....	9
Figura 3.6. Algunos ejemplos de limpiarrejas.....	10
Figura 3.7. Sensor de proximidad de tipo inductivo.	13
Figura 3.8. Sensor de fin de carrera de contacto.	14
Figura 3.9. Sensor de nivel ultrasónico.	15
Figura 3.10. Diagrama de compuerta radial tipo taintor.	16
Figura 3.11. Distribución de fuerzas en una superficie sumergida curva.	18
Figura 3.12. Diagrama de un cilindro hidráulico de doble efecto.....	22
Figura 3.13. Pistón de un cilindro hidráulico.....	23
Figura 3.14. Funciones de membrecía más utilizadas para definir los términos difusos.....	26
Figura 3.15. Conjunto de términos difusos.....	26
Figura 3.16. Arquitectura básica de un controlador difuso.	27
Figura 5.1. Modelo general inicial	33
Figura 5.2. Sistema a modelar inicialmente.	33
Figura 5.3. Diagrama de bloques de primer nivel de la solución.....	39
Figura 5.4. Diagramas del canal hacia el embalse.....	40
Figura 5.5. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en May, 23,10.	41

Figura 5.6. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en Ago, 28,10.	41
Figura 5.7. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en Dic, 01,10.	42
Figura 5.8. Entradas y salidas de la toma de agua vista como un sistema.	45
Figura 5.9. Traslape de funciones de los conjuntos difusos de la toma.	46
Figura 5.10. Traslape de funciones de los conjuntos difusos en el desarenador.	46
Figura 5.11. Niveles en la toma y en el desarenador identificados en una vista lateral de la toma de agua.	47
Figura 5.12. Sensor de nivel ultrasónico Sitrans Probe Lu.	51
Figura 5.13. Ubicación correcta del sensor de nivel.....	52
Figura 5.14. Vista superior de la ubicación definida para los sensores ultrasónicos.	54
Figura 5.15. Vista lateral de la ubicación del sensor de la toma de agua.	55
Figura 5.16. Fotografía de la ubicación que se definió para el sensor en la toma. ...	55
Figura 5.17. Vista lateral de la ubicación del sensor en el desarenador.	56
Figura 5.18. Fotografía de la ubicación definida para el sensor en el desarenador. .	56
Figura 5.19. Diferencia de altura entre los sensores de nivel.....	58
Figura 5.20. Relación entre la corriente y el valor en decimal que se lee en una entrada analógica unipolar.	58
Figura 5.21. Relación entre la señal de la entrada analógica y la señal deseada para utilizar.....	59
Figura 5.22. Algoritmo diseñado para el control de avenidas de la toma de agua optimizada.....	62
Figura 5.23. Sensor de proximidad inductivo para fin de carrera.	67
Figura 5.24. Ubicación de los sensores de fin de carrera para las compuertas radiales R1 y R2.....	68
Figura 5.25. Posibles ubicaciones de los sensores en la compuerta R2.	68
Figura 5.26. Codificador de posición Smar TP301.....	69
Figura 5.27. Eje de R1 que gira junto con la compuerta.	71
Figura 5.28. Diagrama de la ubicación del codificador de posición TP301 en la compuerta R1.....	71

Figura 5.29. Diagrama de flujo para el modo de operación manual.....	74
Figura 5.30. Compuerta de descarga de fondo R1.	77
Figura 5.31. Principales fuerzas sobre la compuerta R1.....	77
Figura 5.32. Columna de agua sobre la compuerta R1.....	79
Figura 5.33. Variación de los momentos de inercia con respecto a h en la compuerta R1.	80
Figura 5.34. Volumen de agua evacuado por la compuerta R1.....	81
Figura 5.35. Compuerta al desarenador (R2).	86
Figura 5.36. Fuerzas aplicadas sobre la compuerta R2.....	87
Figura 5.37. Ubicación de los cilindros hidráulicos en la compuerta R1.....	91
Figura 5.38. Longitud de los cilindros hidráulicos para la compuerta R1.	92
Figura 5.39. Ubicación de los cilindros hidráulicos para la compuerta R2.	93
Figura 5.40. Longitud de los cilindros hidráulicos para la compuerta R2.	93
Figura 5.41. Esquema hidráulico básico utilizado para comprobar la lógica de accionamiento de las compuertas.....	97
Figura 5.42. Diagrama de bloques de segundo nivel de la solución.	99
Figura 5.43. Diagrama de flujo de la rutina <i>Main</i>	101
Figura 5.44. Diagrama de flujo de la rutina <i>InicializarConst</i>	103
Figura 5.45. Diagrama de flujo de la rutina auto para el PLC.	104
Figura 5.46. Algoritmo utilizado para actualizar las acciones a realizar cuando se va a detener R1.	106
Figura 5.47. Temporizador para leer los sensores de nivel.	107
Figura 5.48. Diagrama de flujo de la rutina <i>GenerarSalidas</i>	108
Figura 5.49. Diagrama de flujo de la subrutina <i>Leer_sensor_posicion</i>	110
Figura 5.50. Diagrama de flujo de la subrutina <i>LeerSensorNivel</i>	110
Figura 5.51. Rutina <i>Resetear</i>	111
Figura 5.52. Diagrama eléctrico de los interruptores de la unidad de mando y señalización.	112
Figura 5.53. Diagrama eléctrica de los indicadores luminosos de la unidad de mando y señalización.....	113

Figura 5.54. Interruptores Telemecanique con LED para controlar el sistema.....	113
Figura 5.55. LED Telemecanique para indicar la posición de las compuertas.....	113
Figura 5.56. Encapsulador XAP M Telemecanique.....	114
Figura A.1. Ejemplo de instrucción que asigna el valor a una constante.	127
Figura A.2. Conexión de las salidas por relé del PLC.....	128
Figura A.3. Conexión de un sensor PNP con salida de corriente a un PLC.....	129
Figura A.4. Diagrama eléctrico de las conexiones de las entradas y salidas al PLC.	130

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Algunas características del PLC Simatic S7-200 con CPU 224.	38
Tabla 5.2. Algunas características del módulo de entradas analógicas EM 231.	38
Tabla 5.3. Volumen de agua que se habría obtenido bajo condiciones ideales evitando que se obstruya la reja.	42
Tabla 5.4. Ganancia en producción al evitar una obstrucción en la reja durante una avenida.	42
Tabla 5.5. Valor en milímetros de cada término difuso y fronteras entre ellos en el desarenador.	50
Tabla 5.6. Valor en milímetros de cada término difuso y fronteras entre ellos en la toma.	50
Tabla 5.7. Algunas características del sensor Sitrans Probe Lu.	53
Tabla 5.8. Valores asignados a OSL y OSH para acondicionar la señal del sensor de nivel y de posición angular.	59
Tabla 5.9. Matriz de reglas para la lógica de control de la toma de agua.	65
Tabla 5.10. Principales características del sensor de proximidad inductivo elegido.	67
Tabla 5.11. Principales características del TP301.	70
Tabla 5.12. Descripción de las constantes relacionadas con la posición de R1.	70
Tabla 5.13. Descripción de las señales para el modo manual.	73
Tabla 5.14. Especificaciones de los cilindros hidráulicos de ambas compuertas.	95
Tabla 5.15. Características de los cilindros para cada compuerta.	95
Tabla 5.16. Cantidad de entradas y salidas necesarias para el PLC.	99
Tabla 5.17. Variables que definen las acciones de la rutina <i>Auto</i>	105
Tabla A.1. Constantes que se encuentran en la rutina <i>InicializarConst</i>	126
Tabla A.2. Dirección de memoria de las variables utilizadas en el programa.	131
Tabla A.3. Color y serie de cada interruptor del panel.	132
Tabla A.4. Color y serie de cada LED.	132

Tabla A.5. Consumo de corriente de los principales dispositivos alimentados por la fuente de 24V.....	133
Tabla A.6. Contactos para adquirir la mayoría de dispositivos del diseño.	133

Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo se pretende dar una breve explicación del funcionamiento de la toma de agua y la forma en que se controla una avenida, a partir de eso se expone el problema y la importancia de la solución. El lector podrá ver de forma general la solución que se escogió y los beneficios que esta le otorga a la empresa.

1.1 Problema existente e importancia de la solución.

En una empresa Hidroeléctrica el aprovechamiento del recurso agua es una meta que siempre va a estar presente. Las nuevas tecnologías en instrumentación y automatismo hacen posible que hoy en día las centrales hidroeléctricas sean más eficientes y que se tenga un mayor control de los procesos y procedimientos para la generación de energías limpias.

Las tomas de agua deben reaccionar de forma eficiente ante cambios en el nivel del río principalmente durante avenidas, ya que un mal control puede llegar a producir altos gastos en mantenimiento y pérdidas en producción.

El sistema actual de apertura y cierre de compuertas en la toma de agua requiere más de 40min para abrir o cerrar una compuerta (ver figura 1.1), causando una disminución del flujo de agua al desarenador causado por una obstrucción de la reja (ver figura 1.2). Esto implica el descenso del caudal de entrada al embalse y el riesgo de un incumplimiento en el programa de despacho, lo que conlleva a posibles multas para la empresa además de una disminución de producción.



Figura 1.1. Manivela para abrir la compuerta R1.



Figura 1.2. Reja hacia el desarenador.

La falta de instrumentos de medición de alta tecnología imposibilita realizar un control preciso de la toma de agua, además de la posibilidad de introducir errores de carácter humano.

La reja debe limpiarse de forma periódica y principalmente durante avenidas. La necesidad de ingresar a la zona de la reja para limpiarla manualmente representa un riesgo laboral. Como el nivel de agua sube durante una avenida, el operador no puede limpiar la reja, provocando que se obstruya rápidamente.

La escasez de un sistema automatizado en la toma de agua impide el máximo aprovechamiento del recurso, genera costos en mantenimiento, disminución de la producción, aumento de planilla y genera tareas con riesgos laborales.

1.2 Solución seleccionada.

La empresa está interesada principalmente en automatizar la toma de agua, para aumentar la eficiencia en la derivación de agua del río Platanar hacia el embalse durante avenidas. Con ese objetivo se quiere además facilitar, agilizar y mejorar los procedimientos de apertura y cierre de compuertas, limpieza de las rejas y medición de niveles de agua que se realizan cada hora.

El proyecto busca también disminuir la dependencia de un operador en la toma de agua, bajar los costos de operación y hacer los procesos más exactos a partir de decisiones rápidas e inteligentes por medio del automatismo. Todo esto disminuiría los riesgos en la infraestructura y empleados ante una avenida mal controlada.

La toma de agua, además de operarse de forma automática durante avenidas, debe poder controlarse manualmente por un usuario para realizar tareas de mantenimiento y pruebas principalmente.

La solución consta de un sistema de medición de nivel de agua interpretado por un modelo para detectar una avenida y la obstrucción de la reja mediante principios de lógica difusa, un mecanismo para accionar la compuerta de descarga de fondo y compuerta al desarenador a partir de cilindros hidráulicos, y un algoritmo para PLC con la capacidad de procesar la información y generar señales para el accionamiento de los dispositivos.

Capítulo 2: Meta y objetivos.

2.1 Meta.

Disminuir las tareas de operación y mantenimiento anuales y aumentar la cantidad de agua entregada al embalse durante avenidas.

2.2 Objetivo general.

Diseñar un sistema de automatización que controle la lógica de limpieza de rejilla, apertura y cierre de compuertas de la toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar.

2.3 Objetivos específicos.

- a. Diseñar un modelo cuantitativo para identificar una avenida y una obstrucción de la reja en la toma de agua.
- b. Diseñar una etapa que se encargue de recolectar información para el modelo de la toma de agua.
- c. Diseñar la lógica de control para la toma de agua que busque entregar el máximo caudal al canal durante avenidas.
- d. Diseñar la etapa para el accionamiento de las compuertas que pueda realizar las funciones definidas por la lógica de control.
- e. Diseñar y escribir un programa para PLC que interrelacione todos los módulos del sistema según la lógica de control.

Capítulo 3: Marco teórico

En este capítulo se muestra una breve explicación de la toma de agua, su funcionamiento, descripción de algunos dispositivos electrónicos y conceptos físicos que se requirieron para el desarrollo de la solución, esto con el objetivo de ayudar al lector a comprender más fácilmente el proyecto.

3.1 Descripción de la función y operación de la toma de agua.

La toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar se encarga de derivar agua del río Platanar hacia el embalse de la planta, para la posterior generación de energía. La toma se encuentra en el río Platanar, junto a esta hay una presa de gravedad que funciona como vertedor para evacuar cierta cantidad de agua hacia el río durante avenidas. En la figura 3.1 se muestra un diagrama de la toma de agua donde se pueden identificar las siguientes secciones:

- a. Entrada a la toma: Es por donde ingresa el agua del río.
- b. Rejillas: Se encuentran justo antes de la compuerta del desarenador y compuerta del canal, tienen la función de evitar que ingresen materiales sólidos flotantes que superan cierto tamaño.
- c. Compuerta de descarga de fondo: Tiene como función regresar al río el excedente de agua en la toma y los materiales sólidos pesados que ingresan por ella.
- d. Compuerta de desarenador: Comunica la toma de agua con el desarenador; el cual tiene como función capturar sólidos pequeños pesados que ingresan por la rejilla.
- e. Compuerta al canal: Comunica la toma de agua con el canal que va hacia el embalse de la planta.

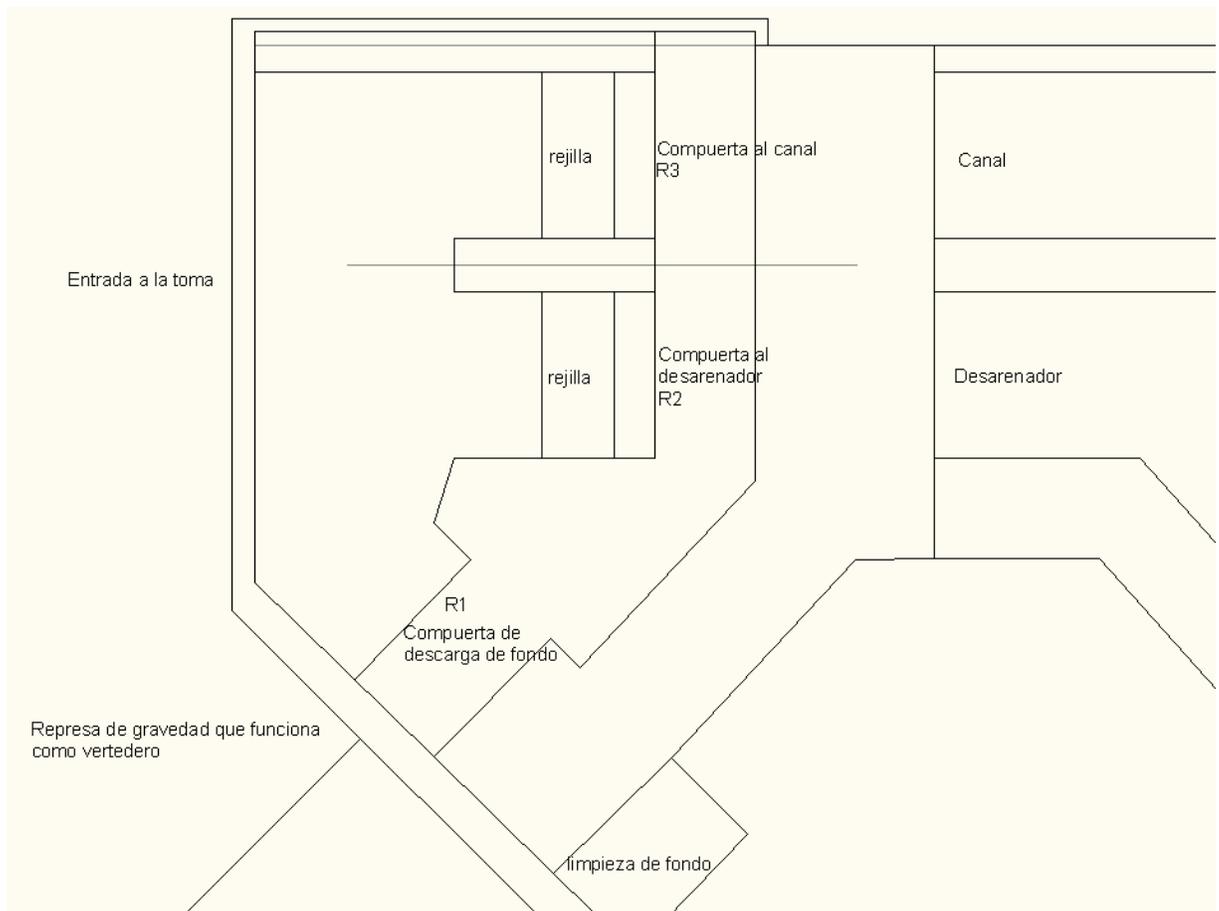


Figura 3.1. Diagrama de una vista superior de la toma de agua.

El recorrido que hace el agua en la toma es el siguiente:

- a. La represa desvía cierta cantidad de agua del río hacia la toma.
- b. El agua en la toma ingresa al desarenador a través de la reja, la cual atrapa los materiales sólidos flotantes (hojas, ramas, etc.). El exceso de agua y materiales sólidos pesados se regresan al río por medio de la apertura de la compuerta de descarga de fondo.
- c. El agua se termina de limpiar en el desarenador y pasa por un vertedor hacia el canal que se comunica con el embalse.

Todas las compuertas son radiales de tipo taintor. La compuerta R2 siempre está abierta y la R3 siempre está cerrada excepto en casos muy especiales. La figura 3.10 muestra un diagrama de una compuerta taintor.

Un operador mantiene limpia la reja de la toma para que el caudal entregado al embalse sea el máximo posible. Durante una avenida se debe abrir la compuerta de descarga de fondo para que mucho material pesado y flotante que ingrese en la toma regrese al río, y además debe mantenerse la reja limpia; ya que cuando ésta se obstruye el caudal hacia el canal puede llegar a ser nulo. Las figuras 3,2, 3.2 y 3.4 corresponden a algunas fotografías de la toma de agua.



Figura 3.2. Toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar; a la izquierda se aprecia el desarenador.

Antes de una avenida el operador abre la compuerta R1 buscando mantener el nivel de agua en la toma debajo del área que le da acceso a la reja. Cuando el agua alcanza cierto nivel, el operador no puede limpiar la reja ocasionando que se obstruya. Al bajar el nivel de agua, el operador limpia la reja y va cerrando la compuerta R1 buscando mantener el máximo flujo hacia el desarenador. La figura 3.5 muestra el algoritmo para operar la toma de agua según sus condiciones actuales.



Figura 3.3. Interior de la toma de agua.



Figura 3.4. Entrada de la toma de agua.

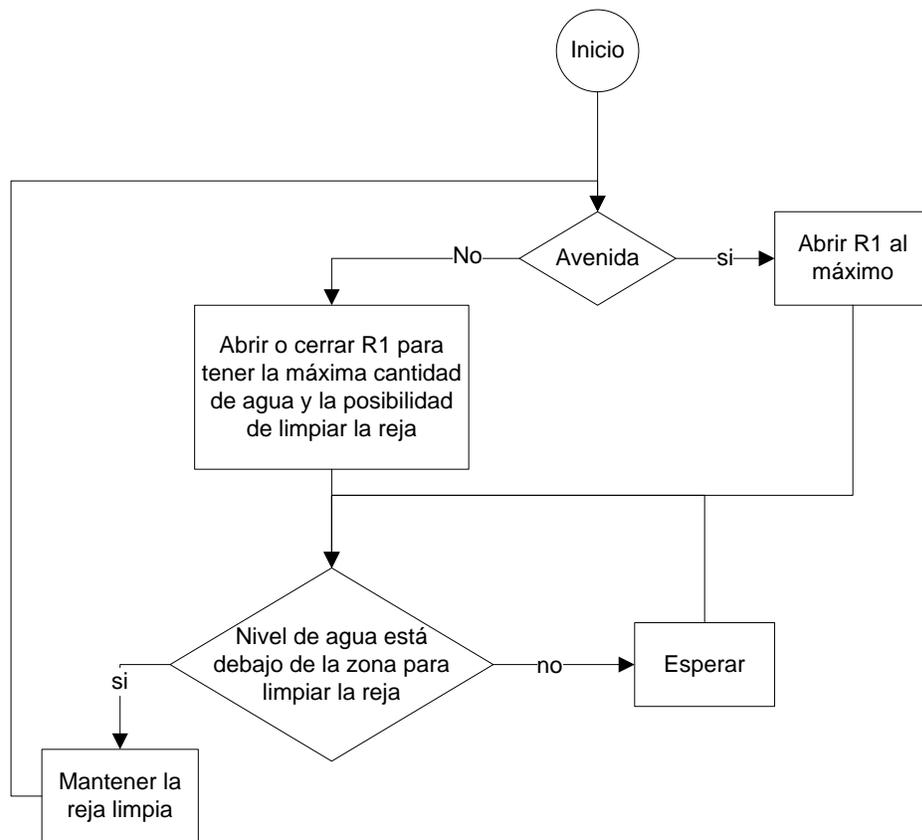


Figura 3.5. Procedimiento para operar la toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar.

3.2 Tecnología aplicable en las centrales hidroeléctricas.

La operación de tomas de agua de centrales hidroeléctricas ha evolucionado con el tiempo. Actualmente muchas están automatizadas de forma tal que se toman mediciones de los niveles de agua en el río, en la toma, el desarenador, medición de caudal al embalse, limpieza automática de la reja, entre otras tareas utilizando tecnología de punta. Los operadores pueden accionar por medio de botoneras o pantallas las compuertas y controlar su apertura de forma precisa. Muchas centrales se controlan completamente de forma remota por medio de un SCADA.

El automatismo permite un control más exacto y preciso. A partir de las mediciones de variables pueden hacerse estudios del comportamiento de la toma de agua en el tiempo, que luego se pueden utilizar para calcular el despacho de energía.

3.2.1 Limpiarrejas [18].

En las tomas de agua se utilizan limpiarrejas para impedir el paso de muchos materiales no deseados.

Por medio de un accionamiento mecánico, ya sea con una especie de rastrillo o brazo se retiran los desperdicios que se encuentran atrapados en esta, se depositan en una canaleta y luego se regresan al río.

Los limpiarrejas funcionan por medio de motores eléctricos o accionamientos hidráulicos y deben hacerse a la medida según las dimensiones del sitio.

Según la complejidad del limpiarrejas pueden llegar a accionarse de forma automática, desde mando remoto o incluir también dispositivos que detecten atascamientos para detener su funcionamiento y proteger el equipo. La figura 3.6 muestra un limpiarrejas de la empresa VIRY-TyEH SALTOS DEL PIRINEO.



Figura 3.6. Algunos ejemplos de limpiarrejas.

3.2.2 PLC [1, 10, 13].

Los controladores lógicos programables conocidos como PLC, son una opción que el mercado brinda para satisfacer muchas necesidades en el control de procesos de la industria. Estos utilizan la electrónica para realizar lectura de variables o identificar eventos tanto de forma digital como analógica, además, sus CPU pueden ejecutar algoritmos con operaciones matemáticas avanzadas de forma rápida y exacta.

El *hardware* de los PLC varía según la necesidad del cliente, ya sea CPU poderosos o más económicos, memorias volátiles y no volátiles, puertos de entrada y salida adaptados en muchos casos para trabajar con señales de 24 V o más, logrando compatibilidad con los protocolos de comunicación industriales.

La incorporación de protecciones contra picos de tensión y corriente, salidas con relés, su facilidad de programación, capacidad de comunicación con otros sistemas y su posibilidad de escalabilidad, hace que sean una alternativa muy efectiva en el control de procesos.

Un PLC básico está formado por módulos de entradas, módulos de salidas, CPU, fuente de alimentación y la terminal de programación.

3.2.2.1 Lenguajes de programación de los PLC.

Debido a que el PLC se inició en el sector industrial para el control de procesos a partir de contactores y relés, el formato utilizado para su programación se hizo pensando en que fuera similar a los diagramas eléctricos que se utilizaban para este tipo de circuitos. Actualmente los PLC hacen tareas muy complejas donde la lógica de contactores y relés no puede dar abasto, por eso los lenguajes de programación fueron evolucionando e incorporan una gran variedad de instrucciones que satisfacen muchas necesidades. Los principales lenguajes de programación son:

- a. Lenguajes de contactos (KOP).
- b. Lenguaje por lista de instrucciones (AWL).
- c. Plano de funciones lógicas (FUP).
- d. Grafcet.

3.2.2.2 Lenguaje KOP.

También llamado lengua de escalera, es uno de los más utilizados porque permite programar el autómata con un formato similar al de esquemas eléctricos.

Al observar un programa en este lenguaje, su lógica puede entenderse en su mayoría apreciándolo como un circuito que contiene una fuente de alimentación, donde la posición y estado de sus elementos, hacen posible que circule una corriente que alimenta cada segmento.

Las instrucciones más básicas de este lenguaje son:

- a. Contactos normalmente abiertos. 
- b. Contactos normalmente cerrados. 
- c. Bobinas. 

En la actualidad los PLC han incorporado más instrucciones para facilitar el diseño de algoritmos. Algunos ejemplos son:

- a. Comparadores.
- b. Contadores.
- c. Operaciones aritméticas con operandos enteros o de punto flotante.
- d. Instrucciones de transferencia.
- e. Desplazamientos.
- f. Temporizadores.

3.2.3 Sensores para procesos industriales [17].

En el automatismo es necesario obtener información del medio en el cual se encuentra el proceso para poder tomar las decisiones correctas. Para adquirir esta información se utilizan sensores de diferentes tipos que pueden variar en su principio de funcionamiento y su tipo de salida.

Los sensores pueden dividirse en sensores para detectar (está o no está) o medir (información analógica). Variables muy comunes de los primeros son: posición, material, color, movimiento, presión, etc. Para el segundo tipo lo más común es medir: presión, caudal, posición, distancia, velocidad, temperatura, etc.

3.2.3.1 Sensores de fin de carrera.

Este tipo de sensor se utiliza mucho en procesos industriales, pueden ser de detección con contacto o detección sin contacto. Las figuras 3.7 y 3.8 muestran un diagrama de cada uno de ellos respectivamente.

Según el tipo de proceso y las posibilidades que se tengan debe de elegirse el tipo de sensor adecuado, algunos ejemplos son: fotoeléctricos, ultrasónicos, de presión, de identificación, radiofrecuencia, entre otros.

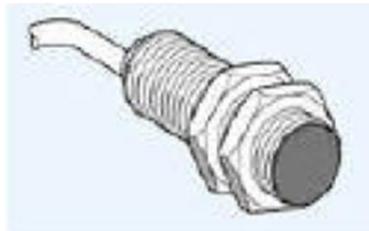


Figura 3.7. Sensor de proximidad de tipo inductivo.

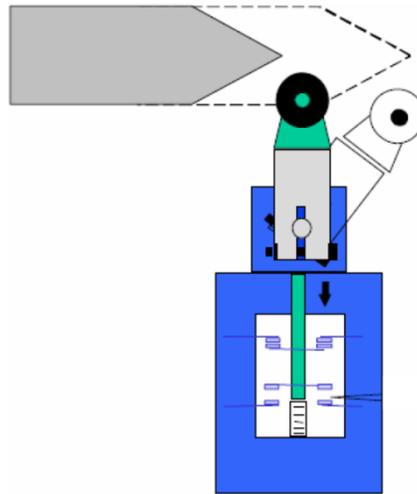


Figura 3.8. Sensor de fin de carrera de contacto.

3.2.4 Sensores analógicos de nivel [3].

Los sensores analógicos de nivel están disponibles según diferentes principios de medición, algunos de ellos son: desplazamiento (flotador), presión diferencial, burbujeo, capacitivo, ultrasonido, radar, entre otros.

3.2.4.1 Sensores de nivel ultrasónicos.

Se basan en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflejante y la recepción del eco del impulso en un receptor. La distancia se calcula de forma indirecta a partir del tiempo que tarda en detectarse el eco. Se utilizan normalmente a una frecuencia de 20 KHz para traspasar medios de gases o vapores y reflejarse en sólidos o líquidos.

Su precisión es del 1 al 3% pero conforme va mejorando la tecnología se va aumentando su exactitud. Un factor importante a tomar en cuenta es la temperatura, ya que ésta afecta el tiempo de propagación de la onda, sin embargo en la actualidad muchos cuentan con un sensor de temperatura y de forma automática realizan el ajuste en la medición.

Su instalación debe tomar en cuenta que no haya obstáculos entre el sensor y el medio a detectar, además debe respetarse cierto margen a los lados del sensor donde no puede haber objetos, el cual está definido por el ángulo de emisión de la onda de sonido. Al seleccionar el sensor debe considerarse la distancia máxima y mínima que puede llegar a medir. La figura 3.9 muestra un diagrama de un sensor de nivel ultrasónico en un tanque.

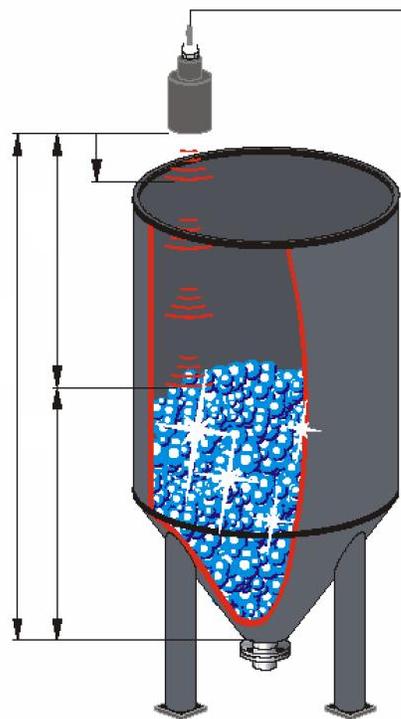


Figura 3.9. Sensor de nivel ultrasónico.

3.2.5 Compuerta tipo taintor [14].

Las compuertas radiales tipo taintor son compuertas de sector pivotante muy utilizadas en tomas de agua para la descarga de fondo. Se trata de un conjunto formado por un tablero mecánico soldado curvo con forma de sector circular, que cierra mediante perfiles de elastómero sujetos al tablero sobre unas partes fijas embebidas en el hormigón. La figura 3.10 muestra una compuerta radial tipo taintor.

Debido a la forma curva de la compuerta, y a su apoyo sobre un pivoto por medio de sus brazos, la fuerza necesaria para levantarla se reduce en comparación con otros tipos de compuertas. Sus principales ventajas son: esfuerzo de elevación considerablemente menor, capacidad de regulación, funcionamiento seguro e izado rápido.

Una compuerta radial consta de los siguientes elementos:

- a. Tablero.
- b. Brazos.
- c. Partes fijas.
- d. Accionamiento.

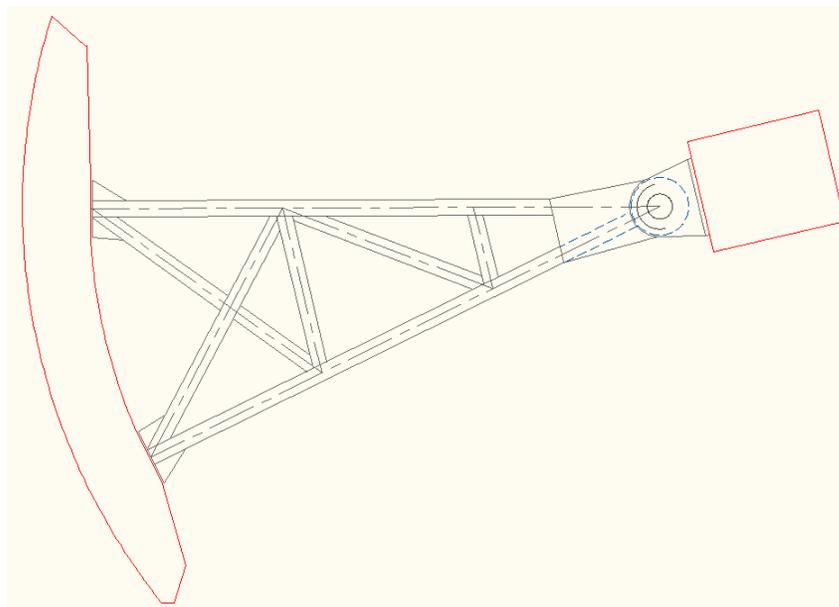


Figura 3.10. Diagrama de compuerta radial tipo taintor.

3.3 Principios físicos y matemáticos considerados para la solución.

3.3.1 Fuerzas sobre una superficie curva sumergida [11].

En una superficie curva sumergida en un fluido estático existen dos fuerzas debidas al fluido: una fuerza vertical F_V y una fuerza horizontal F_H ; las cuales sumadas dan la fuerza resultante F_R igual a

$$F_R = F_H + F_V \quad (3.1)$$

La fuerza F_R actúa de forma perpendicular a la superficie curva, el punto exacto de aplicación de la fuerza se puede calcular a partir de la geometría de la superficie y la profundidad a la que se encuentra. En la figura 3.11 se muestran los vectores y dimensiones necesarios para el análisis.

3.3.1.1 Fuerza horizontal F_H .

Con respecto a la figura 3.11, la fuerza horizontal F_H debe ser igual a la fuerza F_{2b} , la cual se aplica sobre una superficie plana que es igual a la proyección de la superficie curva sobre la cual se aplica F_H . Tenemos que

$$F_{2b} = \gamma h_H A \quad (3.2)$$

La profundidad del centroide del área proyectada es h_c . Para el caso de un rectángulo $h_c = h + s/2$, donde s es la altura de la superficie curva; entonces con la ecuación (3.2) podemos obtener el valor de F_H , tomando w como el ancho de la superficie curva rectangular.

$$F_H = \gamma sw \left(h + \frac{s}{2} \right) \quad (3.3)$$

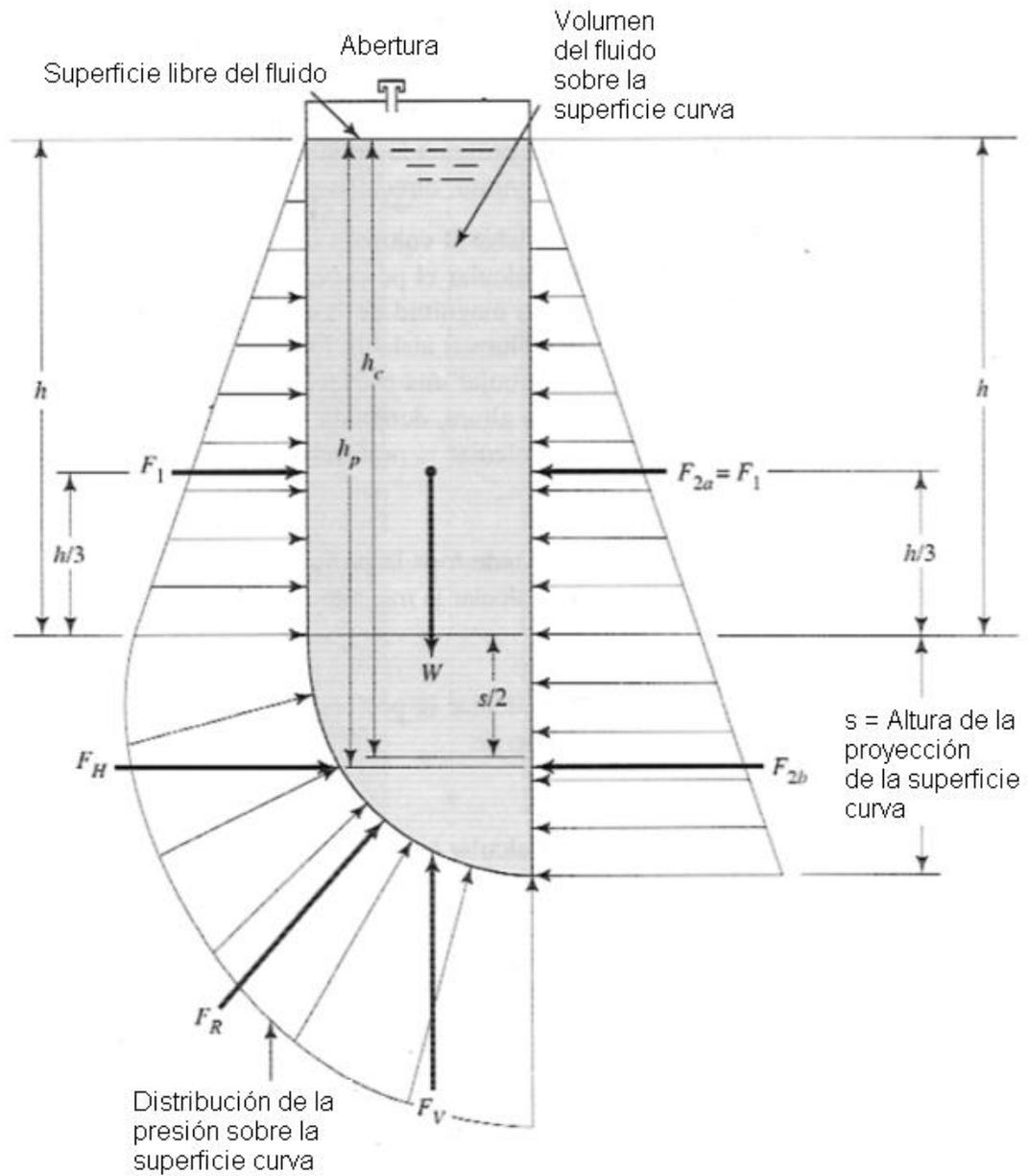


Figura 3.11. Distribución de fuerzas en una superficie sumergida curva [11].

La ubicación de F_{2b} es el centro de presión del área proyectada. Se puede deducir que

$$h_p - h_c = \frac{s^2}{12h_c} \quad (3.4)$$

3.3.1.2 Fuerza vertical F_V .

La magnitud de la componente vertical de la fuerza ejercida por el fluido es igual al peso del fluido. Para calcularla se multiplica el volumen del cuerpo aislado de fluido por su peso específico. La dirección de F_V es hacia arriba en línea al centroide total, que corresponde al volumen desalojado por la compuerta y a la columna de agua sobre ella. Entonces se tiene que

$$F_V = \gamma(\text{volumen}) \quad (3.5)$$

$$\text{volumen} = \text{volumen de la compuerta} + \text{volumen de la columna} \quad (3.6)$$

El cálculo del centroide del volumen total sobre la superficie curva se hace mediante

$$\text{Centroide} = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{A_1 + A_2} \quad (3.7)$$

Donde:

A_1 : Área de la cara en el plano xy del volumen desalojado por la superficie curva.

A_2 : Área de la cara en el plano xy del volumen desalojado por la columna de agua.

x_1 : Centroide del área A1.

x_2 : Centroide del área A2.

A partir de F_V y F_H se calcula F_R , la cual tiene una dirección respecto a la horizontal de

$$\varphi = \tan^{-1}(F_V/F_H) \quad (3.8)$$

3.3.2 Caudal en un canal abierto [11].

En esta central hidroeléctrica se transporta agua desde la toma hasta el embalse por medio de canales abiertos. Estos canales pueden variar en su forma y material. Debido a que los sensores de caudal para son muy costosos, y la exactitud que se requiere para medir este parámetro no es muy alta, se opta muchas veces por estimarlo indirectamente a partir del nivel de agua instantáneo en el canal.

Para el cálculo del caudal se requiere el concepto de radio hidráulico, el cual corresponde a la relación del área transversal neta del flujo ente el perímetro mojado de la sección. Es decir,

$$R = \frac{A}{PM} \quad (3.9)$$

El área A corresponde a la sección transversal formada por el fluido en el canal, mientras que el perímetro mojado PM es la suma de las longitudes sólidas que están en contacto con el fluido.

La velocidad de un fluido uniforme en un canal abierto es igual a

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

Donde S corresponde a la pendiente que tiene el canal abierto y n es un factor de resistencia llamado *n de Manning*, el cual depende del material con que está hecho el canal. Existen tablas para averiguar n a partir del material del canal.

La formula de caudal es

$$Q = Av \quad (3.11)$$

Donde:

A : Área.

v : Velocidad.

A partir de las ecuaciones anterior se puede calcular el caudal en el canal a partir de

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

Donde:

n : Factor de resistencia.

A : Área transversal del agua en el canal.

R : Radio hidráulico.

S : Pendiente del canal.

Específicamente para un canal rectangular se tiene que

$$A = w_c N_c \quad (3.13)$$

$$PM = w_c + 2N_c \quad (3.14)$$

Donde:

w_c : Ancho del canal

N_c : Nivel de agua en el canal

3.3.3 Cilindros hidráulicos [19].

La hidráulica es muy utilizada en la industria para realizar tareas en las que se necesita aplicar una fuerza sobre un cuerpo, esto debido a que el fluido necesario para accionar los cilindros hidráulicos es fácilmente transportado por líneas (mangueras o tuberías), y permite realizar casi cualquier tipo de movimiento mecánico.

Un cilindro actuador es capaz de convertir el desplazamiento de un fluido en desplazamiento lineal, por eso se les conoce como motor lineal. En el diseño de sistemas accionados por cilindros hidráulicos debe tomarse en cuenta que la presión va a determinar la fuerza que se aplicará, y el caudal con que se inyecta el fluido va a definir la velocidad.

Las principales partes de un cilindro tipo pistón son: la camisa, un pistón, vástago, cabezales externos y guarniciones. La figura 3.12 muestra un cilindro de doble efecto.

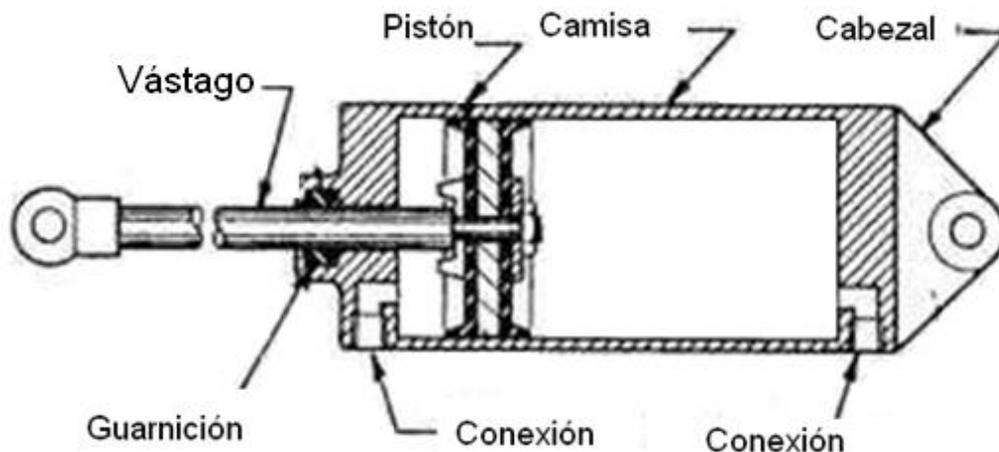


Figura 3.12. Diagrama de un cilindro hidráulico de doble efecto [19].

Al inyectarse fluido por un lado del cilindro, este se irá llenando, lo cual empieza a empujar el pistón generando un desplazamiento lineal a lo largo de la camisa.

Un parámetro necesario en el diseño de cilindros es la carrera, la cual corresponde al desplazamiento total que puede hacer el pistón dentro de la camisa.

Al inyectarse fluido a una cierta presión sobre el pistón, la presión actúa sobre el área transversal efectiva del fluido, dependiendo de si se está extendiendo o contrayendo. En la figura 3.13 se puede observar el vástago y pistón o émbolo de un cilindro hidráulico. El área efectiva al extender el cilindro tomará en cuenta el área total definida por el diámetro del émbolo (DE), mientras que al contraerlo, el área total será la del émbolo menos la del vástago. A partir de la ecuación (3.15) se deduce que el cilindro hidráulico tiene menor fuerza al contraerse que al extenderse, debido a la menor área en la cara posterior del émbolo.

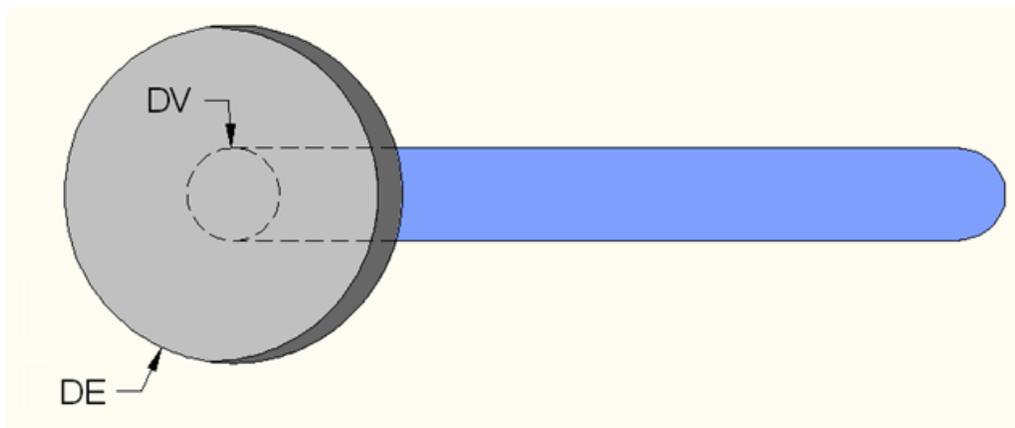


Figura 3.13. Pistón de un cilindro hidráulico

$$F = PA \quad (3.15)$$

La velocidad con que se mueve el cilindro se define por el caudal de fluido que ingresa a la camisa. La relación entre el caudal y la velocidad viene dada por la ecuación (3.11). Luego de definir las dimensiones del cilindro y la velocidad deseada se puede determinar el caudal de fluido requerido.

3.3.4 Lógica difusa [12, 15].

La lógica difusa se utiliza para interpretar información cuando no es posible a través de la lógica clásica, o es muy difícil de hacerlo.

Surge porque en el mundo real nos comunicamos muchas veces por medio de información que es relativa o imprecisa, pero sin embargo nos funciona. Cuando nos referimos a que algo es “grande”, por ejemplo, podría significar algo muy distinto para un ingeniero civil que para un microbiólogo, por eso “grande” es un término difuso.

Decir que una persona es “alta” porque mide más de 1.80 m haría que un sistema de lógica clásica considere a alguien de 1.79 m como “bajo” o “no alto” por ejemplo. La lógica difusa busca suavizar esos límites para que el sistema pueda clasificar las cosas de forma mejor. Si se definiera que una persona es “baja” si mide menos de 1.60 m, el sistema clasificaría a una persona de 1.75 m como “alta” si utiliza la lógica difusa, ya que está más cercana a ser “alta” que a ser “baja”, esto claro va a depender del modelo del sistema.

La lógica difusa se está utilizando cada vez más en el diseño de controladores. Algunos sistemas que la han utilizado son:

- a. Controles para horno.
- b. Estabilización de imágenes en cámaras de video.
- c. Lavadoras de ropa.
- d. Robots.
- e. Aires acondicionados.

Principalmente se decide utilizar la lógica difusa cuando se dificulta controlar un sistema por otros métodos, por ejemplo, cuando intervienen muchas variables, el sistema es no lineal o el modelo matemático es muy complejo.

La lógica difusa utiliza variables lingüísticas. Para clasificar a una persona por su tamaño podrían utilizarse: muy baja, baja, media, alta y muy alta. Una variable lingüística se forma de:

x : Nombre de la variable.

$T(x)$: Conjunto de valores lingüísticos de x .

U : Universo de discurso donde se define $T(x)$.

G : Regla sintáctica para generar los nombres de los valores de x .

M : Regla semántica para asociar cada valor a su significado.

Para el ejemplo anterior, “ x ” corresponde a “*tamaño*”, $T(x)$ es:

$$T(X) = \{\text{muy baja, baja, media, alta y muy alta}\}$$

U indica el universo de valores del conjunto difuso el cual podría ser $U = [1.0, 2.0]$ m. La regla sintáctica corresponde a las palabras que preceden al término, en este caso “muy”. La regla semántica asocia cada valor a su significado, por ejemplo “muy alta” para mayor a 1.80 m y “muy baja” para menor a 1.30 m.

Para definir cada variable lingüística o término difuso se utilizan funciones de membresía, comúnmente se utilizan las que se muestran en la figura 3.14. El más utilizado es el que tiene forma triangular, al juntar todos los términos se debe traslapar uno con otro para definir a cada término. En la figura 3.15 se muestra un ejemplo.

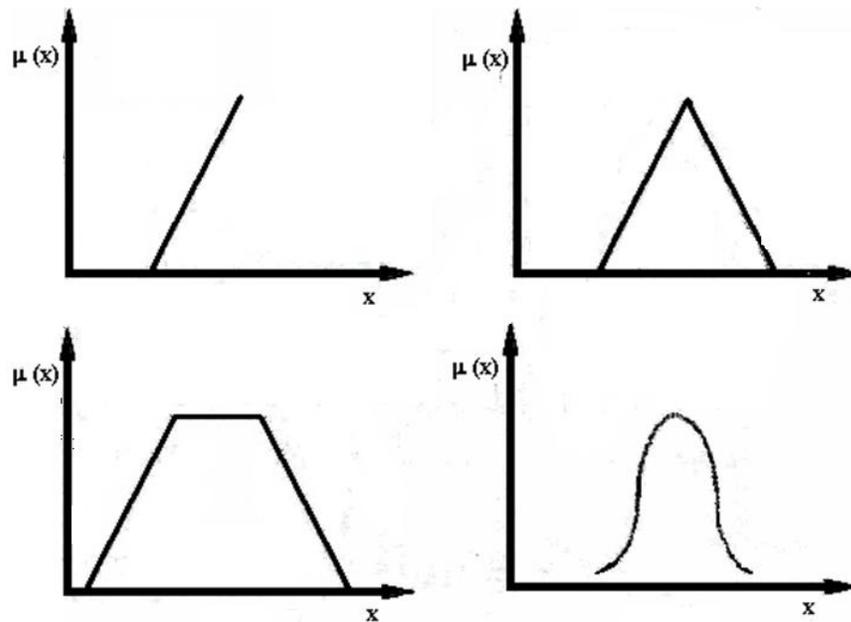


Figura 3.14. Funciones de membrecía más utilizadas para definir los términos difusos.

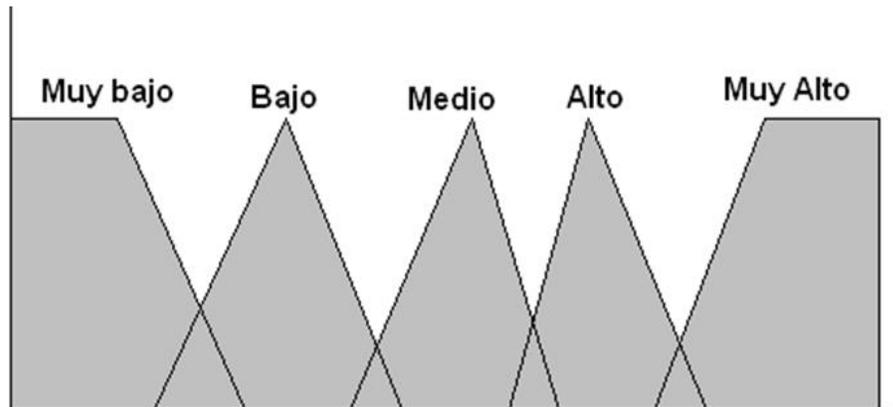


Figura 3.15. Conjunto de términos difusos.

La arquitectura básica de un controlador difuso se muestra en la figura 3.16. La planta provee la información que utiliza el difusificador para determinar si la variable medida es “*baja*”, “*alta*”, etc. Lugo la lógica de control genera las decisiones a partir del estado de cada variable, y el desdifusificador genera la salida en un grado tal que controle la planta según su estado. Todas las etapas se diseñan a partir de una base de conocimientos que normalmente provienen de expertos en el proceso a controlar.

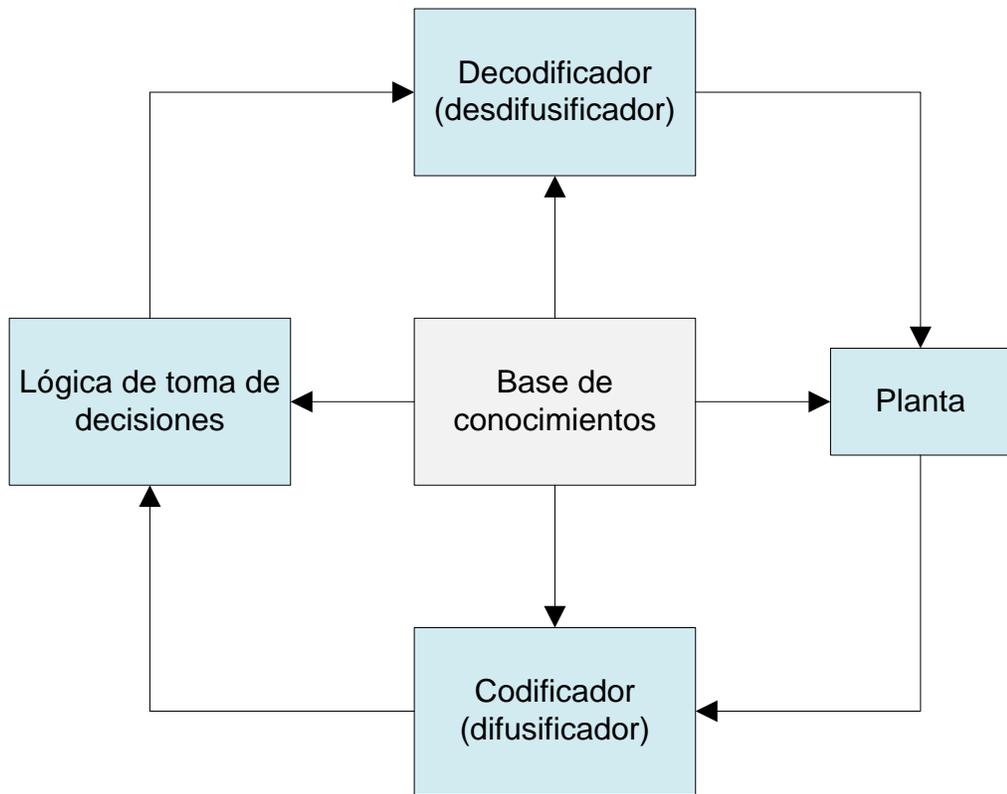


Figura 3.16. Arquitectura básica de un controlador difuso.

Capítulo 4: Metodología.

Para el desarrollo de la solución final se tuvo que seguir todo un procedimiento para ir evaluando las alternativas y descartar las que no convenían o no eran posibles. A continuación se muestran las etapas realizadas en la metodología.

4.1 Reconocimiento del problema en la toma de agua.

Para una correcta identificación del problema que existe en la toma de agua de la Central Hidroeléctrica Platanar, se hicieron varias visitas al sitio para observar la toma, conversar con los operadores y conocer su opinión respecto al proceso.

Se habló con 2 operadores de la toma de agua sin informales acerca del proyecto. La explicación de ellos acerca de los procedimientos a seguir señaló la lenta respuesta de la toma de agua y la dificultad en su control durante una avenida.

Se conversó con los operadores de la casa de máquinas y el jefe de planta, ellos confirmaron que durante una avenida el caudal que ingresa al embalse disminuye, y que debe de notificarse para tomar las acciones respectivas.

Se visitó una toma de agua que posee instrumentos de medición de apertura de las compuertas y del nivel de agua, esto permitió ver las ventajas que tiene una central que utiliza tecnología de punta.

Al observar las herramientas que ofrece el mercado y los costos de las distintas soluciones, se pudo identificar que principalmente se quiere mejorar la respuesta de la toma de agua, aumentando la velocidad de las compuertas y accionándolas de forma automática.

4.2 Obtención y análisis de la información.

Para encontrar la solución indicada se visitaron plantas hidroeléctricas automatizadas para observar la tecnología que utilizan y la forma en que operan. Se habló con ingenieros, técnicos y operadores de planta para generar una “lluvia de ideas” e ir escogiendo las mejores alternativas para la solución.

Se analizaron los planos de la toma de agua, se estudió el comportamiento del caudal en el canal hacia el embalse y se investigó (leyó) literatura sobre mecánica de fluidos, hidráulica y dispositivos electrónicos como sensores, controladores, entre otros.

Para el análisis de fuerzas en las compuertas, además del estudio bibliográfico, se hizo una visita a ingenieros del TEC indagando sobre el tipo de análisis que eso requiere, se consultó también a otros ingenieros con experiencia en centrales hidroeléctricas.

En la selección de los sensores y PLC se consultó con la empresa sobre los distribuidores con los que han trabajado y marcas ya utilizadas, esto para tratar seguir con la misma línea de dispositivos y contactar más fácilmente sus proveedores.

4.3 Selección y verificación de la solución.

Debido a que este proyecto se encarga de la etapa de diseño, no se hizo la implementación, sin embargo se trató de hacer los análisis que permitieran verificar la validez del diseño, de forma que no haya problemas en el momento de la implementación.

Para la comprobación del diseño se buscaron herramientas de *software* de simulación principalmente para sistemas hidráulicos y eléctricos, además de la utilización de un simulador para PLC Siemens S7-200. Los avances que se iban logrando en el diseño se fueron presentando a especialistas en la empresa, esto para tener otra opinión sobre la validez de la solución seleccionada, con la teoría y las simulaciones.

A partir de reuniones periódicas con especialistas en los temas se fue modificando la lógica de control de avenidas, los sensores a utilizar, el mecanismo de apertura de las compuertas entre otros.

Luego de tener el diseño casi listo, los criterios para definir la solución final fueron en su mayoría: la ubicación de los distribuidores, marcas y precios.

Los cálculos matemáticos consideraron factores de seguridad, que sirven de respaldo para soportar posibles variaciones que se dan en la práctica respecto a la teoría.

El diseño del esquema hidráulico se comparó con diseños que ofrece el mercado para verificar su eficacia, además se realizaron simulaciones con el *software* Festo Hydraulic para observar que la lógica del diseño fuera correcta.

El algoritmo programado para el PLC se verificó con el simulador S7-200, el cual permitió añadir el módulo de entradas analógicas y verificar los valores de los registros internos de interés del PLC.

Todas las pruebas de simulaciones se hicieron buscando hacer todas las distintas combinaciones posibles de entradas al sistema, lo cual ayudó a hacer el sistema más robusto, también se le pidió a personas que desconocían del proyecto que realizaran pruebas para verificar aún más el diseño.

4.4 Posibilidades que brinda la solución en el futuro.

Luego de la implementación del proyecto deben hacerse pruebas en el sistema para lograr una respuesta eficiente y eficaz. Las pruebas determinarán que cambios deben realizarse; el diseño permite hacerlo fácilmente.

La información del ángulo de apertura de R1, las acciones que se realizan con las compuertas y del estado del limpiarregas, podría combinarse con un SCADA o con dispositivos HMI basados en pantallas.

La entrada analógica *A/W6* puede utilizarse para medir el nivel en el canal al embalse y estimar el caudal, esta información puede combinarse luego con un SCADA.

El sistema provee información suficiente para poder generar más adelante alarmas respecto a la posición de las compuertas y niveles en el embalse, las cuales podrían transmitirse para observarse de forma remota en un SCADA.

Capítulo 5: Diseño realizado.

A continuación se muestra una descripción detallada de cada etapa de la solución orientada más que todo al área de la ingeniería electrónica.

5.1 Análisis de la solución.

La solución general consiste en un sistema capaz de accionar las compuertas de la toma de agua y limpiar la reja de forma automática, buscando mejorar el control que le daría un operador en el momento de una avenida¹, o también a partir de órdenes introducidas desde una unidad de mando y señalización.

5.1.1 Modelo de la toma de agua.

Para lograr el control automático de la toma de agua se obtuvo un modelo cuantitativo que permitiera identificar:

- a. Una avenida.
- b. Una obstrucción de la rejilla.

Todo modelo de sistema posee sus entradas y salidas (ver figura 5.1). Inicialmente se pensó en hacer un modelo basado en tanques acoplados donde la variable a medir fuera el caudal (ver figura 5.2), sin embargo luego de hacer un estudio de los métodos para medir caudales en la toma de agua, se encontró que el comportamiento del flujo debía cumplir varias condiciones y que se requiere conocer de forma exacta la geometría del sitio. Luego de analizar estos parámetros se encontró que:

¹ La definición se muestra en la sección A.1

- a. La geometría de la toma de agua es compleja.
- b. El suelo de la toma de agua cambia, principalmente por las rocas y arena que se quedan en el fondo durante avenidas.
- c. Se generan flujos de tipo turbulento.
- d. El agua lleva con ella: arena, tierra, rocas, hojas, ramas, etc.



Figura 5.1. Modelo general inicial

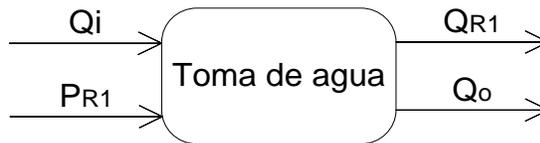


Figura 5.2. Sistema a modelar inicialmente.

Donde:

Q_i : Caudal de entrada a la toma.

Q_{R1} : Caudal que sale por la compuerta de descarga de fondo.

Q_o : Caudal al desarenador.

P_{R1} : Posición de la compuerta R1.

Por las razones anteriores se descartó la posibilidad de utilizar sensores de caudal. Se pensó entonces en estimar el caudal a partir de sensores de nivel, sin embargo por las mismas causas el resultado iba a ser lejano al real.

Como la lógica difusa se aplica para procesos donde el modelo de la planta es difícil de describir o es muy complejo, se optó por obtener un modelo difuso.

Luego de consultar con jefes y operadores de otras plantas hidroeléctricas se determinó que tanto, una avenida como una obstrucción en la reja, pueden identificarse mediante la observación aproximada del nivel de agua en la toma.

Aplicando los conceptos de la lógica difusa, se pudo llegar a definir un modelo cuantitativo a partir del conocimiento de operadores expertos en el control de la toma.

5.1.2 Etapa de recolección de información para el modelo.

Al investigar sobre todos los posibles métodos de medición de nivel de agua que ofrece el mercado, se encontró que a partir del principio físico de medición se dividen en: capacitivo, desplazamiento, burbujeo, ultrasónico, entre otros. Se tuvo que evaluar cual método utilizar según: las posibilidades económicas y prácticas, tipo de respuesta del sensor y las características de la toma de agua. Las opciones se comentaron también con expertos de la empresa que han utilizado algunos de estos sensores para analizar sus recomendaciones. Finalmente se eligieron los sensores de tipo ultrasónico.

Para ubicar los dispositivos se analizaron los posibles lugares que permitieran una medición efectiva y generar información válida para el modelo. Al final se logró definir una ubicación que permite la correcta operación, posibilidad de calibración y brindarle alimentación eléctrica.

5.1.3 Lógica de control de la toma de agua.

La figura 3.5 corresponde a un diagrama de flujo de la lógica de control que le dan los operadores a la toma de agua. Sabiendo que se va a contar con un sistema de medición electrónico del nivel de agua y uno de accionamiento automático para las compuertas, se procedió a diseñar el algoritmo para el control del sistema.

Inicialmente se iba a controlar solamente la compuerta R1 y la limpieza de la reja. Los expertos en el tema sugirieron cerrar la compuerta R2 cuando la reja se obstruye por completo, por esto se decide utilizar la combinación de las compuertas R1 y R2 para el control de avenidas; en la actualidad solamente se hace con R1.

Parecía que R1 podía controlarse solamente con posiciones de abierta o cerrada, pero los operadores dijeron que para entregar la mayor cantidad de agua al canal y poder tener acceso a la reja, se requiere abrir la compuerta de descarga de fondo hasta posiciones intermedias, es por eso que se decide abrir R1 hasta la posición que entrega mayor cantidad de agua al canal sin inundar la toma.

Unos de los aspectos más críticos a definir fue el momento apropiado para cerrar y abrir R2, esto no fue fácil porque los operadores no utilizan R2 para el control de avenidas. Luego de formular varias hipótesis mediante reuniones en la empresa, se decide cerrar R2 cuando el nivel en la toma es “muy alto” o cuando se detecte una obstrucción completa de la reja, y abrirla hasta que el nivel se normalice. La figura 5.22 muestra la lógica de control definida a utilizar.

Como ningún sistema es confiable al 100% y se requiere poder controlar el sistema para realizar pruebas o mantenimientos, el diseño cuenta con un modo de operación manual que le permita al operador controlar el sistema.

5.1.4 Etapa de accionamiento de las compuertas.

La toma de agua posee las compuertas R1, R2 y R3, sin embargo el control de avenidas solamente requiere accionar a R1 y R2, es por eso que la etapa de potencia actúa sobre ambas compuertas.

El mecanismo de apertura actual se realiza mediante la acción de una manivela (ver figura 1.1), por lo que se pensaba que se podría adaptar un sistema motorizado a la caja reductora de esta. Luego de indagar con mecánicos de la empresa y hacer visitas a otras centrales, se encontró que los mecanismos de apertura y cierre de compuertas taintor se han especializado, y funcionan de forma efectiva con cilindros hidráulicos, principalmente por:

- a. Facilidad de levantamiento de cargas pesadas.
- b. Sus tiempos de apertura en un 100% son de alrededor de 5min para la mayoría de centrales.
- c. Se les puede incorporar una bomba de acción manual para poder operar sin corriente eléctrica.

Además de las ventajas de los sistemas hidráulicos, la utilización de las cajas reductoras se descartó porque la caja reductora de R2 está dañada, eliminando la posibilidad de ahorro si se reutilizaba.

5.1.5 Programa para el PLC.

Debido a que el PLC es la opción más utilizada para automatismo en la industria y a que la empresa ya cuenta con algunos dispositivos de este tipo, se decidió utilizar un PLC para la solución.

La marca y modelo de PLC a utilizar, se seleccionó tras una investigación en Internet de las opciones que ofrece el mercado. Las características que se establecieron para la selección del controlador son:

- a. Entradas digitales.
- b. Entradas analógicas.
- c. Salidas digitales.
- d. Capacidad para añadir módulos a futuro.
- e. Posibilidad de comunicación a futuro para un posible sistema SCADA.
- f. Velocidad de procesamiento.
- g. Precio.

Algunas opciones presentaban velocidades de procesamiento muy limitadas, de menos de 10 Hz, aunque este sistema no requiere una respuesta muy veloz, se decidió buscar algo más rápido para evitar posibles problemas a futuro.

La mayoría de PLC tiene solo entradas y salidas digitales, luego de ir avanzando en el diseño del algoritmo se definió que se iban a necesitar alrededor de 9 entradas y salidas digitales, lo cual está dentro de las características de la mayoría de PLC. Pocos modelos cuentan con entradas analógicas lo que requirió que se le pudiera añadir un módulo para trabajar con señales de 4-20 mA, esto porque son la más utilizadas en la industria.

La capacidad de comunicarse a futuro con un sistema SCADA no fue una limitante, ya que en la actualidad está muy estandarizado y la mayoría de PLC lo soportan, viene ligado más bien a la posibilidad de agregarle módulos extra.

El precio vino a limitar mucho las opciones ya que los PLC más modernos cumplen con las características que se necesitaban, y las versiones más económicas se limitan mucho a las mismas. Al final se decidió optar por el modelo de marca Siemens para seguir con la línea de PLC de la empresa. Se buscó una opción económica pero con la posibilidad de expansión para varios módulos. En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran algunas características del PLC y módulo de entradas analógicas seleccionados.

Tabla 5.1. Algunas características del PLC Simatic S7-200 con CPU 224.

Entradas digitales	14
Salidas digitales	10
Módulos de expansión	7
Ajustes analógicos	2
Matemática de punto flotante	Sí
Velocidad en instrucciones booleanas	0.22 microsegundos/instrucción.
Consumo máximo	280 mA a 120 VAC
Consumo de entrada digital	24 VDC a 4 mA

Tabla 5.2. Algunas características del módulo de entradas analógicas EM 231.

Entradas	4
Salidas	0
Consumo	4 W, 60 mA
Formato de palabra unipolar	0 a 32000
Resolución	12 bits
Rango de entrada	0-20 mA
Tiempo de conversión	< 250 us

5.1.6 Solución final.

Luego del proceso de análisis de cada solución y su respectivo rediseño y corrección de errores, se llegó a una solución final. En la figura 5.13 se muestra un diagrama de bloques de la solución, que de forma resumida consta de:

- a. Una etapa de medición de niveles en la toma y en el desarenador que se comunica en un solo sentido con el controlador.
- b. La etapa encargada del accionamiento de las compuertas tiene una comunicación bidireccional con el controlador, debido a que requiere recibir las señales de control para apertura y cierre de las compuertas, e indicar al controlador la posición de R1 y R2.

- c. El controlador está conformado por un PLC y una unidad de mando que permite al operador interactuar con el sistema, recibir las señales de los sensores, generar la señal de control para limpiar la reja y las acciones de apertura y cierre de compuertas. El PLC toma todas las decisiones basándose en un algoritmo diseñado para imitar los procedimientos realizados por los operadores de la toma, además de algunas consideraciones para mejorar la respuesta durante avenidas.

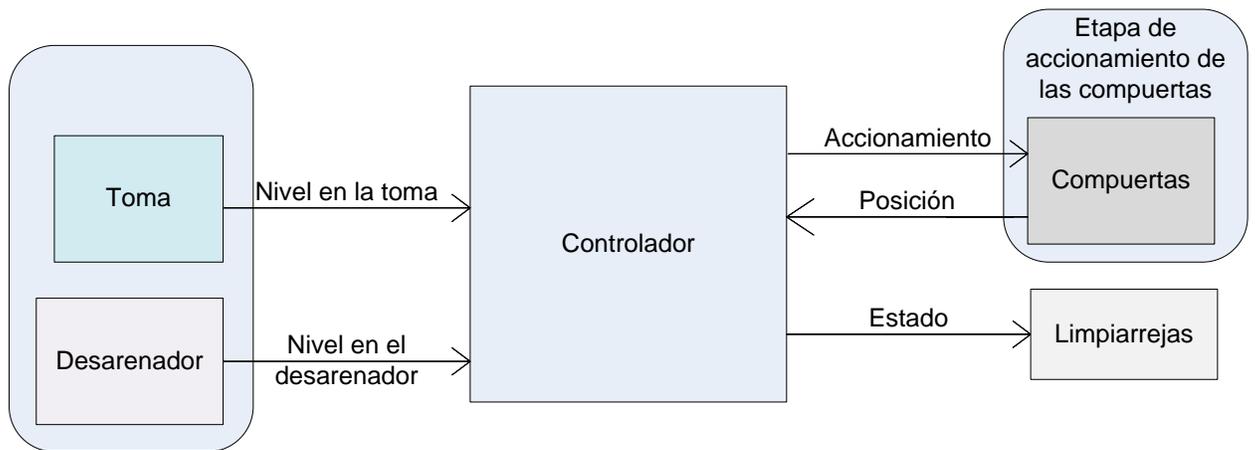


Figura 5.3. Diagrama de bloques de primer nivel de la solución.

5.1.7 Beneficios económicos de la solución.

La automatización y optimización de una toma de agua tiene ganancias económicas representativas, sin embargo un análisis detallado del impacto económico del proyecto se sale de los objetivos de este informe. A continuación se muestran las áreas que se verán beneficiadas económicamente con el proyecto.

5.1.7.1 Evitar pérdidas de producción por avenidas.

Actualmente una avenida obstruye la reja y se entrega un caudal nulo o casi nulo al canal durante varias horas dependiendo de la avenida. El caudal desaprovechado podría utilizarse para la generación de energía.

A partir de las ecuaciones de la sección 3.3.2 se puede calcular el caudal hacia el embalse, en la figura 5.4 se muestra un diagrama del canal. Para el canal de interés se tiene un valor de $n = 0.017$ por ser concreto colado, una pendiente $S = 0.001$ y el ancho del canal es $w_c = 2$ m, además el operador de la toma de agua mide el nivel sobre cresta y el nivel en el canal cada hora, a partir de esto se estimó el caudal al embalse.

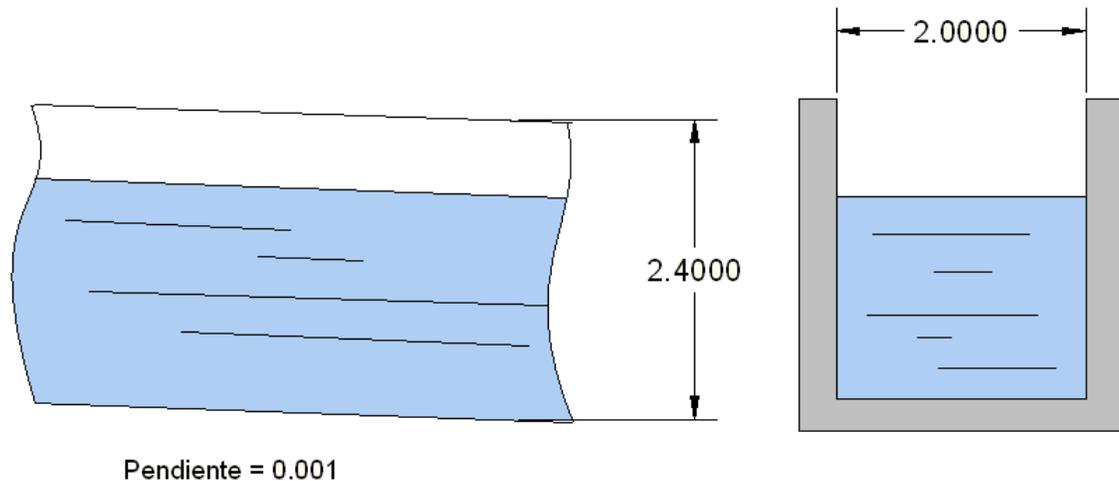


Figura 5.4. Diagramas del canal hacia el embalse.

En las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se puede observar la variación de caudal y nivel sobre cresta en la toma de agua con respecto al tiempo, de esta forma se puede relacionar el caudal con la intensidad de una avenida. Los datos utilizados son de avenidas escogidas al azar en las fechas May, 23, 2010, Ago, 28, 210 y Dic, 1, 2010. A continuación se muestra el cálculo del caudal para un nivel de 1.5m.

$$Q = \frac{1}{0.017} 2 * 1.5 \left(\frac{2 * 1.5}{2 * 2 + 2 * 1.5} \right)^{\frac{2}{3}} 0.001^{\frac{1}{2}} = 3.96 \frac{m^3}{s}$$

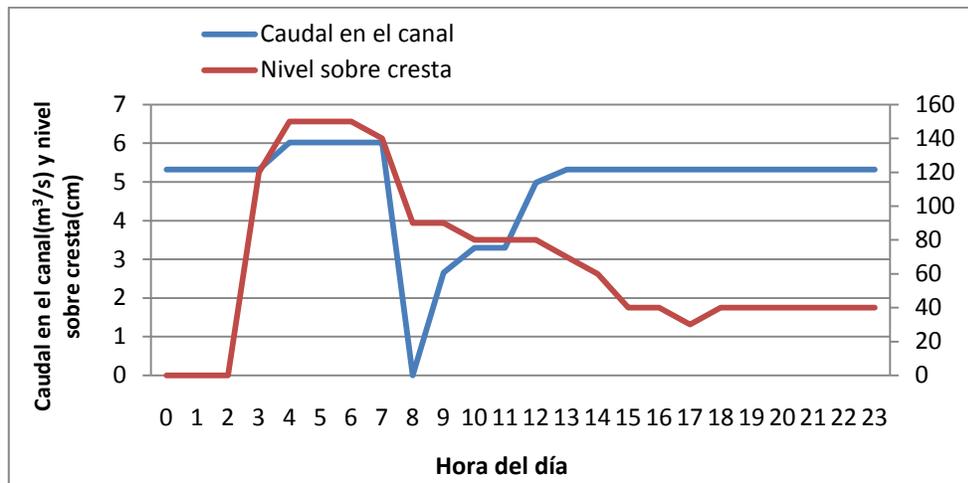


Figura 5.5. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en May, 23,10.

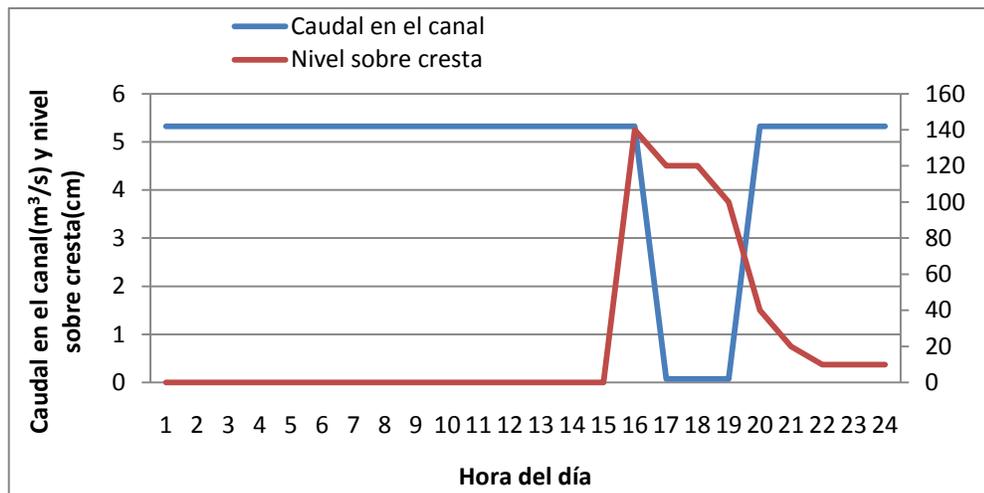


Figura 5.6. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en Ago, 28,10.

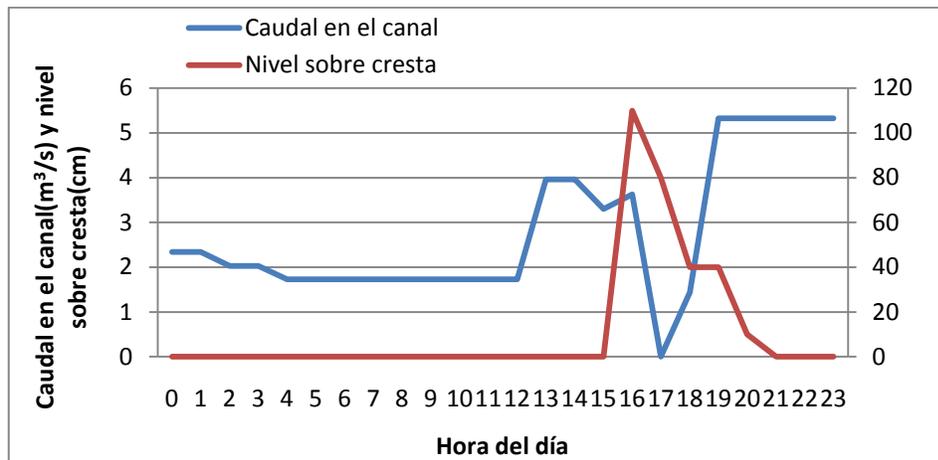


Figura 5.7. Caudal en el canal (eje izquierdo) y el nivel sobre cresta en Dic, 01,10.

Por medio de cálculos a partir de las gráficas, se obtuvo las pérdidas debido a la disminución del caudal, esto se muestra en la tabla 5.3. A partir de la cantidad de agua que no se entregó se estimó la producción que habría generado, los resultados se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.3. Volumen de agua que se habría obtenido bajo condiciones ideales evitando que se obstruya la reja.

Fecha de avenida	Volumen a entregar sin obstrucción (m ³)	Volumen entregado (m ³)	Diferencia (m ³)
May, 23, 10	48276	21258	27018
Ago, 28, 10	76608	19152	57456
Dic, 1, 10	108000	46674	61326

Tabla 5.4. Ganancia en producción al evitar una obstrucción en la reja durante una avenida.

Fecha de avenida	Caudal extra por 19 horas en fuera de punta (m ³ /s)	Potencia extra fuera de punta por 19 horas (MW)	Producción fuera de punta (MW)	Ganancia (%)	Ganancia de energía (USD)
May, 23, 10	0.395	0.846	5.093	16.6	884
Ago, 28, 10	0.840	1.800	9.860	18.2	1026
Dic, 01, 10	0.896	1.921	12.027	15.9	1095

5.1.7.2 Operación

Actualmente la toma de agua requiere 3 operadores para controlar en todo momento la toma de agua (uno por jornada), pero en realidad sus labores son requeridas principalmente en invierno durante avenidas. Este proyecto podría pasar estas labores al operador de la planta, comunicando a futuro el sistema con un SCADA (la empresa ya utiliza ésta tecnología), de esta forma controlarla de forma remota con facilidad; lo cual representa una disminución en los costos de operación.

5.1.7.3 Mantenimiento:

El río y el embalse requieren limpiarse todos los años para remover material del fondo. La última limpieza del área de la toma de agua requirió aproximadamente 100 horas de utilización de maquinaria. Al aumentar la velocidad de respuesta de la toma durante avenidas, puede evitar tanto el ingreso de suciedad al desarenador, como la retención de rocas en la toma de agua.

Al realizar labores especiales de mantenimiento que requieren accionar las compuertas de la toma de agua, o un accionamiento de emergencia de las compuertas debido a un fallo en el canal, agilizaría las labores de mantenimiento y podría evitar daños en la infraestructura, ya que las compuertas pasarían a responder de alrededor de 1 hora cada una, a 5 min las dos al mismo tiempo.

5.1.7.4 Seguridad.

La necesidad de un operador en la toma de agua durante una avenida representa un riesgo laboral, además; la lenta respuesta que tiene la toma de agua y los errores humanos que pueden darse ponen en riesgo la infraestructura. Al disminuir los riesgos laborales se disminuye la posibilidad de accidentes que conllevarían a altos gastos por parte de la empresa para repararlos.

5.2 Diseño de la solución

5.2.1 Obtención de un modelo de la toma de agua.

Con el objetivo de identificar una avenida y una obstrucción en la reja se requirió obtener un modelo cuantitativo del sistema. La forma en que se eligió el tipo de modelo se observa en la sección 5.1.1.

El modelo se construyó a partir de la experiencia de los operadores que han controlado la toma de agua durante varios años; ellos reconocen las avenidas observando el nivel de agua, y a partir de eso realizan acciones sobre la compuerta R1.

Además de controlar R1, el operador se encarga de limpiar la reja cuando ésta se va obstruyendo con hojas, ramas, etc. El operador observa los sólidos acumulados en la reja para saber el momento que requiere limpieza, sin embargo las centrales hidroeléctricas que han automatizado esta tarea, identifican el momento de limpiarla midiendo el nivel de agua antes y después de la misma; ya que si existe un diferencial de nivel entre antes y después de la reja, se debe a que no está fluyendo agua de forma normal y se requiere activar el limpiarrejas.

El modelo inició a partir del esquema más general (ver figura 5.1) donde las entradas son:

- a. **Nivel de agua en la toma:** Corresponde al nivel de agua antes de la rejilla.
- b. **Nivel de agua en el desarenador:** Corresponde al nivel de agua después de la rejilla.

A partir de esa información es que en la mayoría de las centrales hidroeléctricas se logra identificar tanto una avenida como una obstrucción en la reja, además los operadores confirman que ellos podrían controlar la toma de agua observando esas variables.

Nuestro sistema entonces corresponde a un sistema MIMO, la figura 5.8 muestra el diagrama de la toma de agua vista como un sistema.

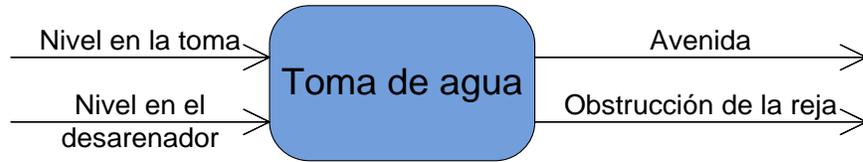


Figura 5.8. Entradas y salidas de la toma de agua vista como un sistema.

5.2.1.1 Caracterización de los conjuntos difusos.

Luego de definir las variables de entrada del modelo se definió el universo de discurso que define a cada una variable, estos se indican a continuación.

- Nivel en la toma (*Nivel1*): [0, 6000] mm
- Nivel en el desarenador (*Nivel2*): [0, 6000] mm

Seguidamente cada variable se descompuso en los siguientes conjuntos de valores lingüísticos o términos difusos:

Nivel en la toma (*Nivel1*):

- Muy bajo.
- Bajo.
- Medio.
- Alto.
- Muy alto

Nivel en el desarenador (*Nivel2*):

- Bajo.
- Medio.
- Alto.

Cada término difuso se trasladó para definir de forma más suave la transición entre uno y otro. Se definieron funciones de membresía de triángulo para los valores intermedios y de trapecio para los extremos. En la figuras 5.9 y 5.10 se observa esto gráficamente.

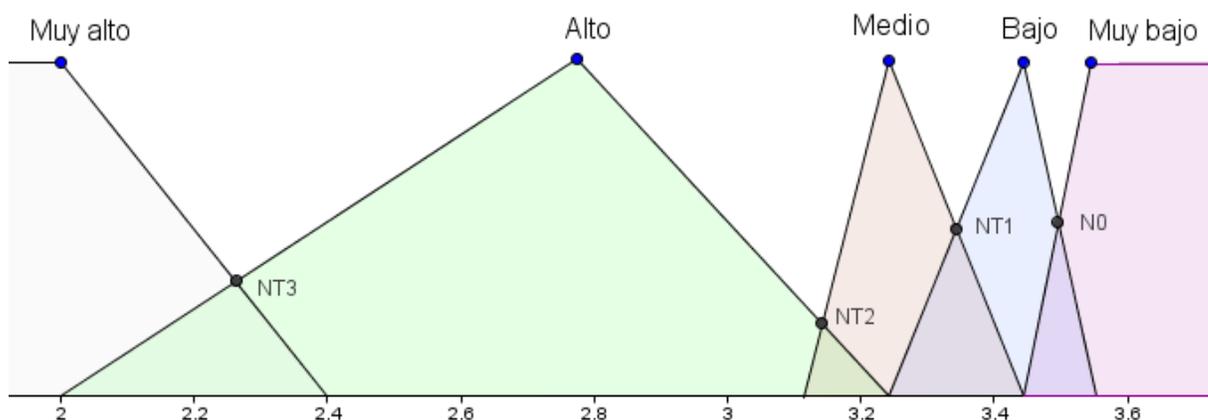


Figura 5.9. Traslape de funciones de los conjuntos difusos de la toma.

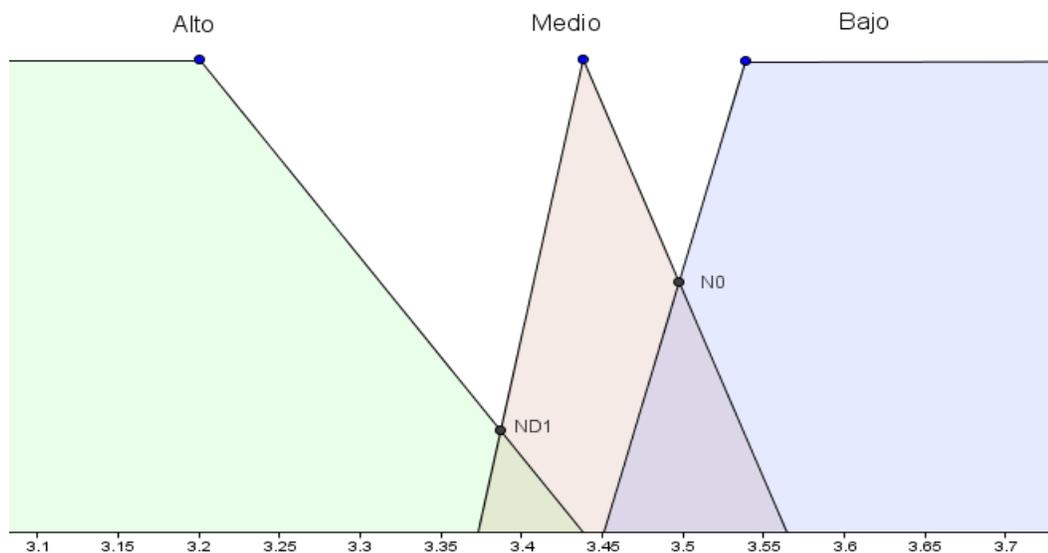


Figura 5.10. Traslape de funciones de los conjuntos difusos en el desarenador.

En las figuras 5.9 y 5.10 se muestran las funciones de membrecía de cada variable, el punto de intersección entre un triángulo y otro define la regla semántica para asociar cada valor a su significado, donde los límites entre un conjunto y otro se definen por: *N0*, *NT1*, *NT2*, *NT3* y *ND1*.

5.2.1.2 Niveles en la toma de agua (variables lingüísticas).

En la figura 5.11 se pueden identificar los distintos niveles que se definieron para las variables *Nivel1* y *Nivel2*. A partir de esto se caracterizó cada uno según criterios de expertos para identificar cuando existe obstrucción de la reja y/o avenida.

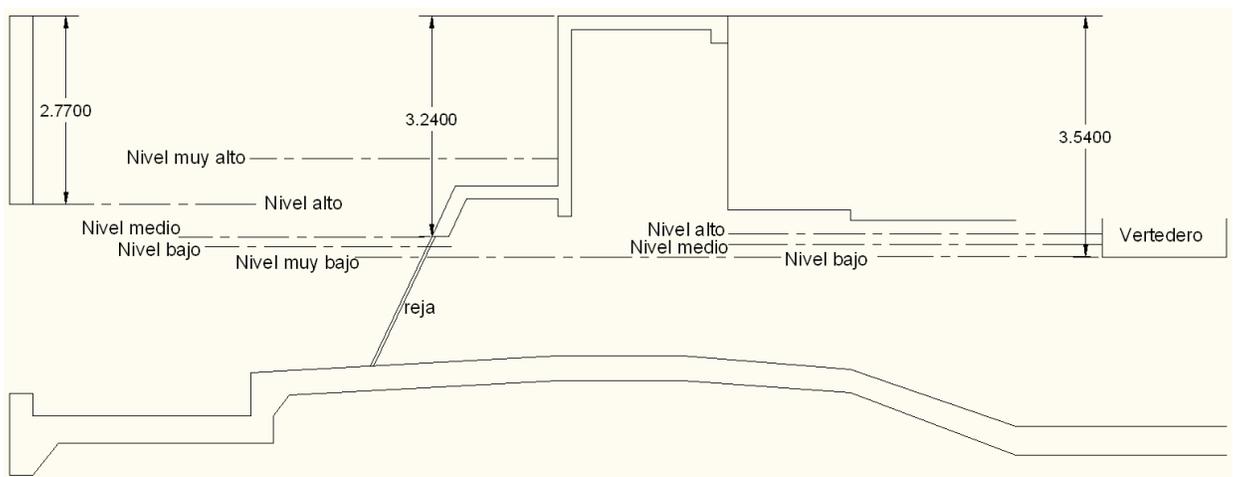


Figura 5.11. Niveles en la toma y en el desarenador identificados en una vista lateral de la toma de agua.

Nivel en la toma (*Nivel1*).

- Nivel medio:** Es el nivel de máximo aprovechamiento de agua, se encuentra al nivel que empieza la reja, más nivel es agua en exceso (avenida), y menos significa que el canal no está en su máximo. Normalmente el nivel es inferior a éste y se alcanza durante las lluvias.
- Nivel bajo:** Es el nivel más probable a ocurrir, se encuentra a unos 20 cm debajo de donde inicia la reja. A este nivel no hay avenida

- c. **Nivel muy bajo:** Solamente ocurre en verano luego de varios días sin lluvias. Es el mínimo nivel posible y está definido por el vertedero en el desarenador.
- d. **Nivel alto:** Está sobre el nivel de la reja, justamente donde el agua toca la pared en la entrada de la toma (ver figura 3.4). El agua alcanza este nivel con fuertes lluvias e indica la presencia de una avenida.
- e. **Nivel muy alto:** El agua llegará a este nivel cuando existe una avenida y la compuerta R1 no logra evacuar el exceso de agua en la toma. A este nivel es muy probable que la reja esté obstruida.

Nivel en el desarenador (*Nivel2*).

Los niveles en el desarenador vienen relacionados específicamente para que el sistema logre identificar la obstrucción en la rejilla, estos se especifican a continuación.

- a. **Nivel bajo:** A este nivel prácticamente no ingresa agua al desarenador por lo que su vertedero desaloja muy poco caudal, solamente ocurre en épocas muy secas o cuando la reja se obstruye por completo.
- b. **Nivel normal:** La mayor parte del tiempo el agua está en este nivel. Si la toma tiene un nivel “Medio” o mayor, la reja está obstruida, sino, debe hacerse una comparación entre el nivel antes y después de la reja.
- c. **Nivel alto:** Solamente se alcanza cuando el nivel del río sube, lo definen unos vertederos laterales que evitan que se inunde el desarenador. A ese nivel la reja está limpia.

5.2.1.3 Fronteras entre cada término difuso.

Se debió definir la ubicación de los puntos *NO*, *NT1*, *NT2*, *NT3* y *ND1* modificando las funciones de membrecía de cada término difuso de las figuras 5.9 y 5.10. Aunque estos valores luego pueden variar conforme se hagan pruebas reales en el sistema, se establecieron a través de criterios de expertos en el tema, sin embargo su efectividad se comprobará solamente en la práctica. Como estos valores definen el rango o regla semántica de cada término difuso, y para cada uno de estos se realizan acciones, se tuvo que analizar los valores que van a permitir un comportamiento adecuado del sistema, por ejemplo:

- a. Como el nivel “Medio” define la diferencia entre el exceso y la falta de agua en la toma, es decir, fuera de este nivel R1 debe abrirse o cerrarse; se le definió un rango tal que evite abrir y cerrar constantemente la compuerta ante cambios mínimos del nivel.
- b. El criterio anterior sugiere que el nivel “Medio” tenga un rango grande, sin embargo también se quiere que sea pequeño, ya que entre más pequeño sea, más rápido reaccionará el sistema.
- c. El inicio del nivel “Muy alto” debe alcanzarse solamente en avenidas grandes que pronostiquen una pronta obstrucción en la reja, o al menos que la probabilidad sea alta.

En las tablas 5.5 y 5.6 se muestran los valores que definen cada término difuso y la frontera entre uno y otro, la cual puede variarse modificando los valores en el programa por una persona autorizada. Este procedimiento se muestra en la sección 5.2.5.4.

Tabla 5.5. Valor en milímetros de cada término difuso y fronteras entre ellos en el desarenador.

Bajo	<i>NO</i>	Medio	<i>ND1</i>	Alto
3540	3500	3440	3370	3200

Tabla 5.6. Valor en milímetros de cada término difuso y fronteras entre ellos en la toma

Muy bajo	<i>NO</i>	Bajo	<i>NT1</i>	Medio	<i>NT2</i>	Alto	<i>NT3</i>	Muy alto
3540	3500	3440	3340	3240	3140	2770	2260	2000

5.2.2 Etapa de recolección de información para el modelo.

En esta sección se muestra el diseño de la etapa que obtiene la información del medio requerida por el modelo. Como el modelo se basa en la medición de niveles de agua, se hizo una investigación de los sensores que se encuentran en el mercado para tal propósito. A partir de las características de la toma y el medio a medir, se seleccionó el sensor y se definió su lugar de instalación.

5.2.2.1 Selección del sensor.

A continuación se muestran los parámetros que se siguieron para seleccionar los transmisores aptos para la solución.

- a. **Rango de distancias:** Para el caso de la toma de agua, esta tiene una altura máxima de unos 6 m desde el fondo de la toma hasta la parte más alta.
- b. **Lugar donde se encuentra el líquido a medir:** La toma de agua es un espacio abierto, muchos sensores están diseñados para funcionar en recipientes o contenedores cerrados, por lo que estos se descartaron.
- c. **Condiciones del líquido:** El agua del río no es completamente limpia, y durante una avenida se arrastran piedras, arena, ramas, hojas, etc.

- d. **Resistencia:** En una avenida, un sensor ubicado dentro del agua debería ser muy resistente, ya que de otra forma puede dañarse, por otro lado, existen sensores que no entran en contacto con el líquido.
- e. **Precisión:** Existen sensores de nivel muy precisos, del orden de décimas de milímetro, en este caso una exactitud del orden de centímetros es suficiente.
- f. **Temperatura de trabajo.** Existen sensores en los cuales la medición varía según la temperatura del medio. En este caso existen variaciones en la temperatura del agua y del aire dependiente de la época.

Se consideró utilizar sensores de nivel por medición de presión, estos son de menor costo que otras opciones, sin embargo la experiencia que tiene la empresa con ellos recomendó no utilizarlos; principalmente por el mantenimiento que requieren ya que durante avenidas se exponen a suciedad. Los sensores ultrasónicos tienen las características óptimas según los parámetros mencionados anteriormente, y principalmente se eligieron porque no requieren mantenimiento, ni corren peligro de dañarse durante una avenida.

Los sensores elegidos son los Sitrans PROBE LU de Siemens. La figura 5.12 muestra una fotografía del sensor.



Figura 5.12. Sensor de nivel ultrasónico Sitrans Probe Lu.

Estos sensores son configurables tanto para medir nivel, como distancia entre el dispositivo y el agua (ver figura 5.13). Debido a que durante avenidas el fondo de la toma y del desarenador, se torna irregular por la acumulación de piedras y/o arena en el suelo, podrían darse mediciones de nivel erróneas requiriendo calibrar el dispositivo nuevamente, por eso es que se seleccionó la medición de distancia.

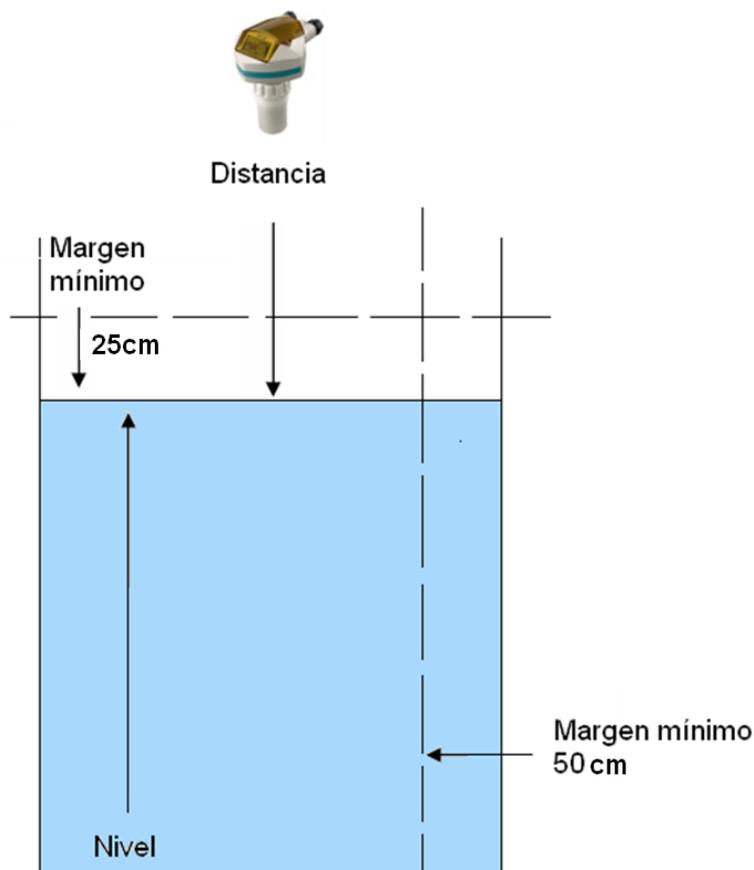


Figura 5.13. Ubicación correcta del sensor de nivel.

5.2.2.2 Características del sensor.

Toda la información acerca del sensor se encuentra en el manual de usuario que facilita Siemens [7]. A continuación se muestran algunas de las características más relevantes para el diseño de la solución.

Tabla 5.7. Algunas características del sensor Sitrans Probe Lu.

Característica	Descripción
Consumo de corriente	20 mA en lazo de 2 hilos
Frecuencia	54 KHZ
Máximo error	6 mm
Rango de medición	0.25 m – 6 m
Tiempo entre cada medición	2.4 s
Compensación de temperatura	Sí
Memoria	No volátil
Interface	Profibus PA
Pantalla de cristal líquido	Sí

5.2.2.3 Ubicación de los sensores.

La ubicación de los sensores en la toma de agua debía definirse pensando en:

- a. Posibilidad de acceso.
- b. Recomendaciones del fabricante.
- c. Seguridad.
- d. Distancia a la fuente de alimentación.

En la figura 5.13 se pueden identificar las restricciones según el fabricante. El sensor deberá estar al menos a 25 cm de altura sobre el nivel máximo a medir, y a más de 50 cm de las paredes de la toma de agua; debe colocarse perpendicular al nivel del agua en un lugar alto para evitar ser alcanzado por una avenida. La distancia entre el sensor y la toma de agua debe ser tal que, pueda alimentarse con una fuente de 24 Vcd y lograr una comunicación efectiva con el PLC.

Sensor en la toma.

En la figura 5.14, el área sombreada de la izquierda representa el lugar que permite una correcta medición asegurando 0.5 m respecto a las paredes, sin embargo la que se adecua mejor, principalmente por su facilidad de acceso, se puede apreciar en la imagen con un círculo de color. La vista lateral de la ubicación que se definió se observa en la figura 5.15; se debe tratar de ubicar lo más alto posible para aumentar la seguridad del dispositivo. En la figura 5.16 se muestra una fotografía del lugar donde irá el sensor.

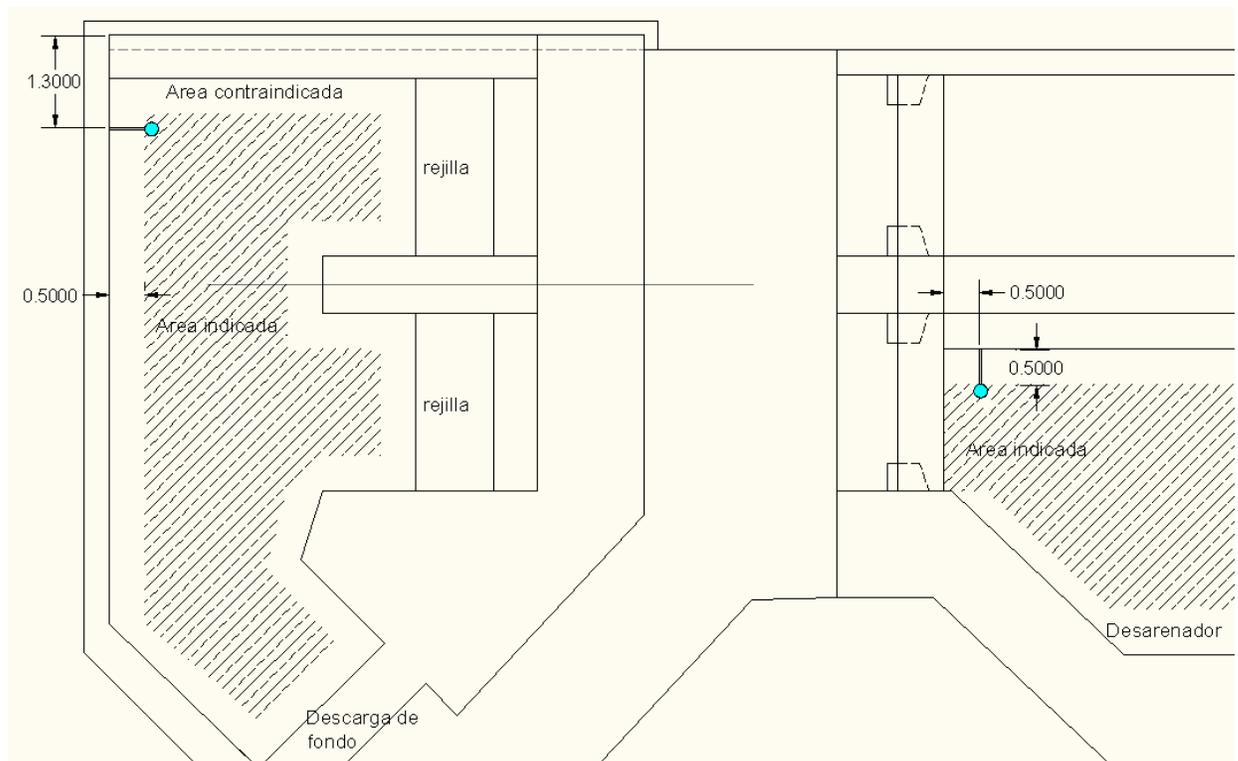


Figura 5.14. Vista superior de la ubicación definida para los sensores ultrasónicos.

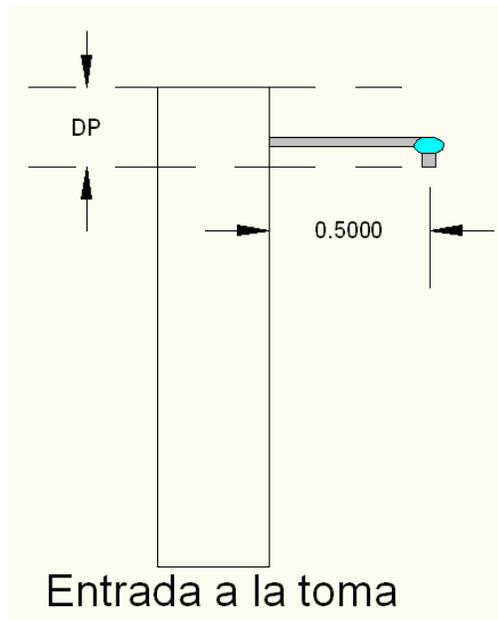


Figura 5.15. Vista lateral de la ubicación del sensor de la toma de agua.



Figura 5.16. Fotografía de la ubicación que se definió para el sensor en la toma.

Sensor en el desarenador.

Para el sensor en el desarenador se procedió de forma similar. En la figura 5.14 se observa la posible ubicación por medio del área sombreada de la derecha, y con un círculo pequeño se muestra el lugar elegido para colocarlo. La figura 5.17 muestra la vista lateral de la ubicación del sensor. La figura 5.18 muestra una fotografía del lugar donde se colocará y con un círculo rojo se observa la zona donde hará la medición; deberá hacerse un brazo para sostenerlo a la baranda que se observa a la izquierda en la imagen.

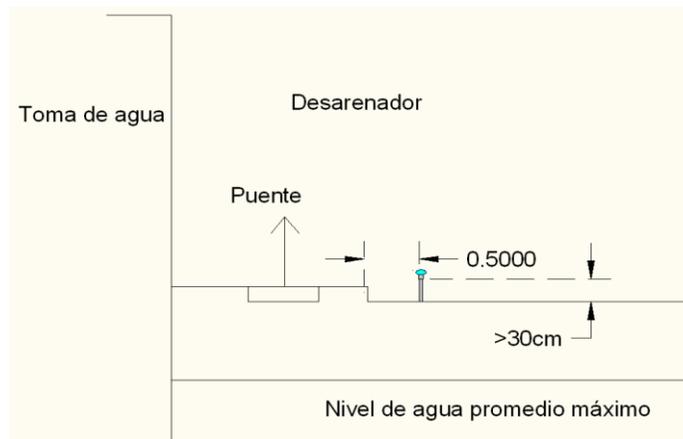


Figura 5.17. Vista lateral de la ubicación del sensor en el desarenador.



Figura 5.18. Fotografía de la ubicación definida para el sensor en el desarenador.

Conexión de los sensores.

Los sensores se conectan mediante un lazo de corriente de 2 hilos, en la figura A.4 se muestra la conexión de los sensores (*Nivel1* y *Nivel2*) al módulo de entradas analógicas EM 231 que se añade al PLC.

5.2.2.4 Ajustar la medición del sensor del desarenador (*Nivel2*).

En el manual del sensor se muestran todos los pasos de cómo calibrar los sensores. Debido a que se ubicarán a diferente altura pero se necesita comparar la medición de ambos, deben calibrarse los dos de la misma manera.

Pasos a realizar:

- a. Calibrar ambos sensores para medición de distancia, con distancia máxima igual a *OSH* y mínima igual a *OSL*, la forma de definir estos valores está en la sección 5.2.2.5.
- b. Ubicar los dos sensores.
- c. Medir la diferencia de altura entre los dos transmisores Δh (ver figura 5.19), este valor corresponde a la variable *DifAltura* y debe insertarse en el programa del PLC (ver sección 5.2.5.4).
- d. Medir la distancia *DP* en milímetros (ver figura 5.17), este valor corresponde a la variable *DP* y debe insertarse en el programa del PLC (ver sección 5.2.5.4).

Las lecturas de distancia del sensor 2 van a ser:

$$Nivel2 = medición + (\Delta h) \quad (5.1)$$

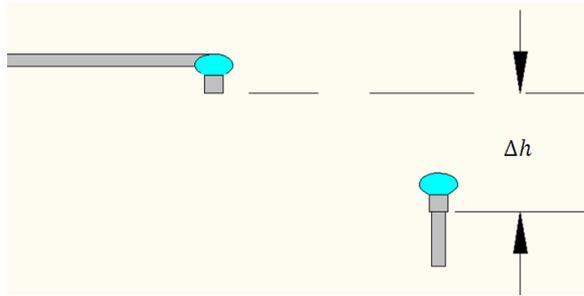


Figura 5.19. Diferencia de altura entre los sensores de nivel.

De esta forma los dos sensores parecerán estar a la misma altura, y así podrán utilizarse las mediciones en la lógica de control para detectar una obstrucción en la reja.

5.2.2.5 Acondicionadores de señal.

Para acondicionar la señal se encontró la relación entre el valor de corriente y el valor en decimal que se lee de cada entrada analógica del PLC, la relación se muestra en la figura 5.20.

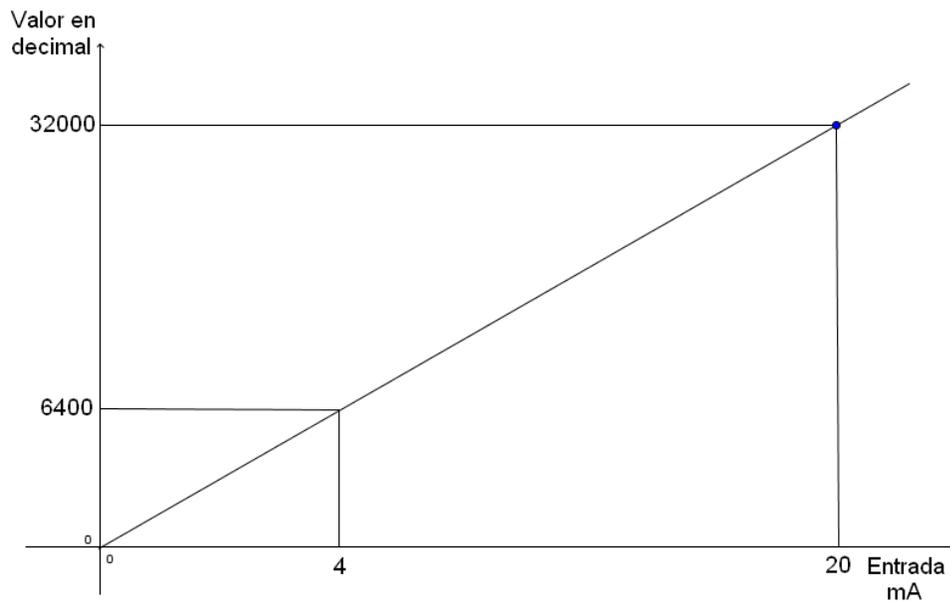


Figura 5.20. Relación entre la corriente y el valor en decimal que se lee en una entrada analógica unipolar.

A partir del valor mínimo y máximo que se obtiene al leer la entrada analógica, se asocian con el valor mínimo y máximo físico real de la variable medida, tal como se muestra en la figura 5.21, donde *OSL* es el valor mínimo de la variable leída y *OSH* representa su máximo.

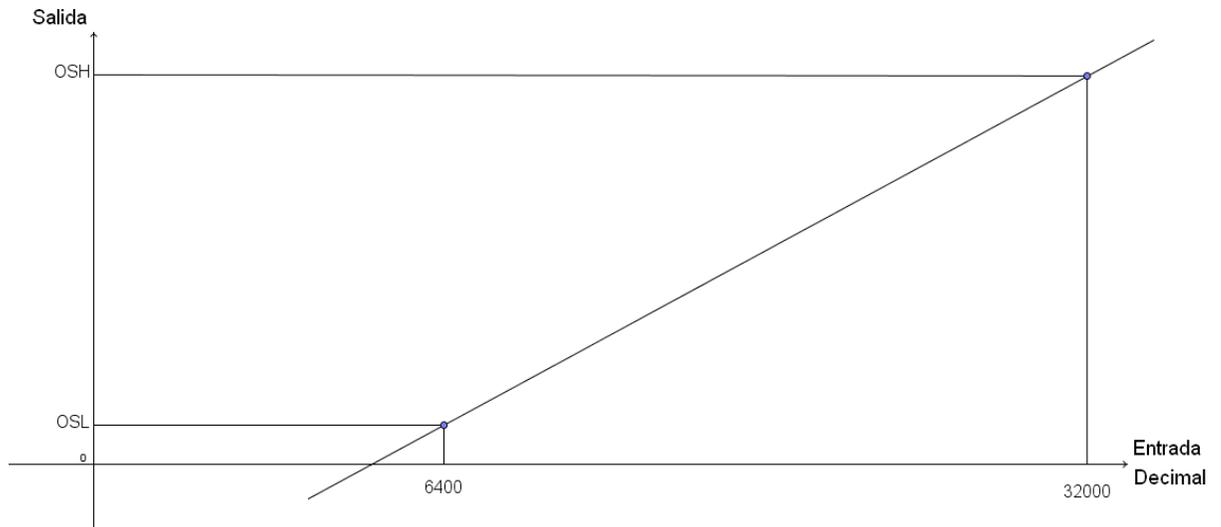


Figura 5.21. Relación entre la señal de la entrada analógica y la señal deseada para utilizar.

En la tabla 5.8 se muestran los valores de *OSL* y *OSH* utilizados tanto para los sensores de nivel como para codificador de posición, del cual se habla más adelante.

Tabla 5.8. Valores asignados a *OSL* y *OSH* para acondicionar la señal del sensor de nivel y el codificador de posición.

Parámetro	Sensor de nivel	Codificador de posición
OSL	350	0
OSH	5900	1000

Los valores utilizados para el sensor de nivel de la tabla 5.8 son en milímetros, desde 350 mm hasta 5900 mm; la posición de la compuerta se mide en porcentaje de apertura, desde 0.0% hasta 100.0%. En la sección 5.2.3.5 se explica todo lo referente al sensor de posición angular.

Modificar el acondicionador de señal.

En caso de que por alguna razón se tuvieran que cambiar los valores de la tabla 5.8, puede hacerse realizando los cálculos que se muestran a continuación; sin olvidar luego actualizar los valores en la rutina *InicializarConst* del programa del PLC (sección 5.2.5.4).

Cambiar *OSL* y *OSH* de los sensores de nivel.

El valor de *OSL* y *OSH* se fijó para medir la distancia en milímetros (desde 350 hasta 5900), sin embargo podrían variarse para medirla de forma distinta, por ejemplo en centímetros; para esto debe estudiarse el modelo de la toma para que sea compatible. Estos valores deben ser los que se utilicen para calibrar los sensores de nivel, utilizando *OSL* para 4 mA, y *OSH* para 20 mA (consultar el manual del sensor). Al cambiar cualquiera de esos valores, el acondicionador de señal va a modificarse de la siguiente manera.

$$mn = \frac{OSH - OSL}{32000 - 6400} \quad (5.2)$$

$$bn = OH - 32000mn \quad (5.3)$$

Cambiar OSL y OSH del sensor de posición de la compuerta.

Los valores de *OSL* y *OSH* indican el valor físico que queremos interpretar de la medición que hace el sensor analógico. Se estableció *OSL* = 0 y *OSH* = 1000 para que representen la apertura de la compuerta en porcentaje (de 0.0% a 100.0%), aunque podrían utilizarse otros valores si el usuario lo desea, u otro tipo de medición, por ejemplo grados o radianes de apertura.

Los valores de *OSL* y *OSH* corresponden a las posiciones que se definieron al calibrar el sensor TP301, utilizando *OSL* para 4 mA y *OSH* para 20 mA. Al cambiar cualquiera de esos valores el acondicionador de señal va a modificarse de la siguiente manera.

$$mc = \frac{OSH - OSL}{32000 - 6400} \quad (5.4)$$

$$bc = OH - 32000mc \quad (5.5)$$

5.2.3 Lógica de control de la toma de agua.

La lógica de control de la toma de agua, se diseñó a partir de los procedimientos seguidos por los operadores en la actualidad y recomendaciones de expertos en el tema. El diseño pretende modernizar la toma de agua a través de:

- a. Apertura y cierre de compuertas (R1 y R2) de forma automática para disminuir su tiempo de respuesta y facilitar estas tareas.
- b. La posibilidad de encender y apagar un limpiarrejas que se haría a la medida.
- c. Un sistema que mide los niveles de agua antes y después de la reja.
- d. Instrumentación que permite conocer la posición de las compuertas R1 y R2.

Se diseñó un algoritmo que a partir del nivel de agua en la toma interpretado por el modelo de la planta desarrollado, genere acciones que van a levantar o cerrar las compuertas y limpiar la reja buscando optimizar la derivación de agua. El correcto control de la toma requiere también utilizar la información de la posición de las compuertas. El algoritmo se muestra en la figura 5.22.

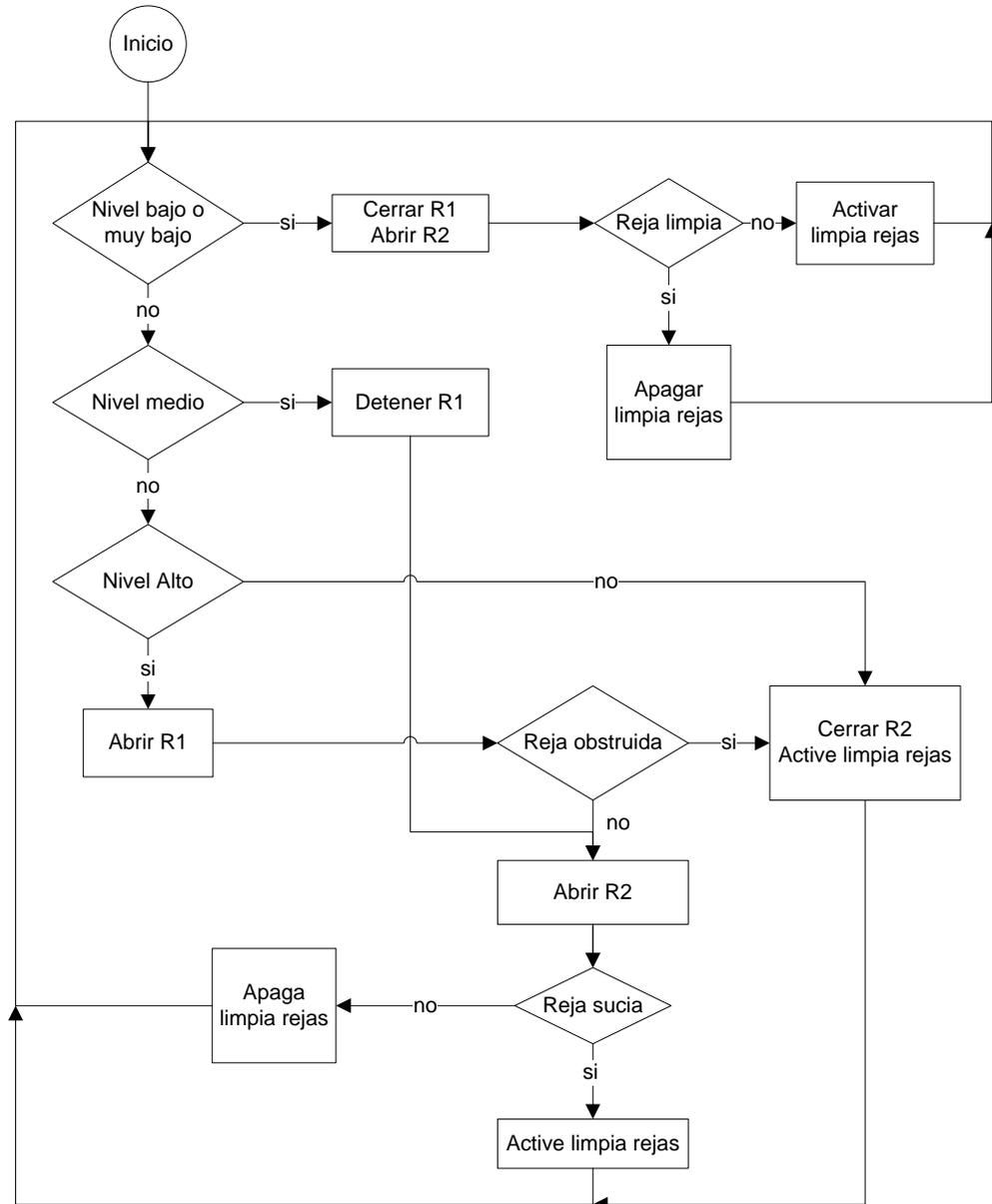


Figura 5.22. Algoritmo diseñado para el control de avenidas de la toma de agua optimizada.

La forma en que se controla R1 y R2 es la siguiente:

- a. La compuerta R2 se cerrará cuando se detecte una obstrucción completa de la rejilla con un nivel “Alto” en la toma.
- b. La compuerta R2 se cerrará siempre que el nivel de la toma sea “Muy alto”.
- c. Luego de que R2 se cierre, esta se abrirá hasta que el nivel en la toma sea “Medio”.
- d. La compuerta R1 se abrirá cuando el nivel en la toma sea “Alto” o “Muy alto”.
- e. La compuerta R1 se cerrará cuando el nivel en la toma sea “Bajo” o “Muy bajo”.
- f. La compuerta R1 se detendrá si el nivel en la toma es “Medio”.

5.2.3.1 Detección de una obstrucción en la reja.

Un problema que se da en la toma de agua, es la obstrucción de la reja por materiales flotantes como ramas y hojas principalmente. Aunque la reja se obstruye más que todo durante avenidas, también se puede ir obstruyendo en condiciones normales. La forma de saber cuándo limpiar la reja es la siguiente.

- a. Nivel1 es “Medio” o mayor y Nivel2 no es “Alto”.
- b. Nivel1 es “Bajo” o “Muy bajo” y $\Delta Nivel > DNm$.

Donde:

DNm: Diferencial de nivel aceptado antes de considerar que la reja está obstruida.

ΔNivel: Diferencia del nivel entre el desarenador y la toma, es igual a

$$\Delta Nivel = Nivel2 - Nivel1 \quad (5.6)$$

Nivel1 es la medición del nivel en la toma y *Nivel2* (ver ecuación (5.1)) es la medición del nivel en el desarenador. Debe aclararse que en realidad estos niveles son la distancia entre la toma y el nivel del agua, por lo que una magnitud mayor indicará menor cantidad de agua, además $\Delta Nivel$ será siempre positivo tomando en cuenta que no puede haber más agua en el desarenador que en la toma.

Las condiciones anteriores muestran que la detección de la reja requiere evaluar el *Nivel1*, *Nivel2* y la diferencia entre los dos niveles ($\Delta Nivel$). A partir de *Nivel1* se puede saber si se debe verificar la condición *a* ó *b* para limpiar la reja.

5.2.3.2 Reglas de control.

Conociendo las acciones a realizar a partir de los niveles en la toma, se construyeron las reglas de control en forma de matriz, de forma tal que el sistema pueda efectuar siempre una acción para cualquier combinación en sus señales de entrada. La tabla 5.9 muestra la matriz de reglas de control.

Tabla 5.9. Matriz de reglas para la lógica de control de la toma de agua.

Toma (NIVEL1)						
Desarenador (NIVEL2)		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
	ΔNivel < DNm	Cerrar R1	Cerrar R1	x	x	x
		Abrir R2	Abrir R2	x	x	x
		NLR ¹	NLR	x	x	x
	ΔNivel > DNm	Cerrar R1	Cerrar R1	x	x	x
		Abrir R2	Abrir R2	x	x	x
		NLR	LR	x	x	x
	Bajo	x	x	Detiene R1	Abrir R1	Abrir R1
		x	x	Abrir R2	Cerrar R2	Cerrar R2
		x	x	LR	LR	LR
	Medio	x	x	Detiene R1	Abrir R1	Abrir R1
		x	x	Abrir R2	Abrir R2	Cerrar R2
		x	x	LR	LR	LR
	Alto	x	x	Detiene R1	Abrir R1	Abrir R1
		x	x	Abrir R2	Abrir R2	Cerrar R2
x		x	NLR	NLR	LR	

Los términos con una “x” en la tabla 5.9 corresponden a condiciones que no son evaluadas ya que la obstrucción en la reja depende en unos casos de Δ Nivel y para otros de Nivel2.

¹ Indica que no se debe limpiar la reja. LR significa lo contrario.

5.2.3.3 Otras consideraciones para el control efectivo.

La toma de agua no se puede controlar solamente a partir de la información que brinda la tabla 5.9, ya que la posición de las compuertas juega un papel fundamental. A continuación se muestran las consideraciones que se tomaron:

- a. El mecanismo de acción para la apertura de las compuertas debe detenerse cuando estas se abran por completo, esto para evitar dañar el equipo.
- b. Si la compuerta R1 está abierta, esta requiere un cierto nivel de apertura mínimo (asignado por el usuario), ya que para una apertura menor a la misma, se genera una turbulencia fuerte que debe evitarse.
- c. Para la operación normal de la toma de agua, el cilindro no hace esfuerzo al cerrar la compuerta porque ésta baja por su propio peso. El doble efecto de los cilindros hidráulicos solamente se utiliza para cerrar las compuertas durante una emergencia con el nivel en la toma muy alto.

Además de lo mencionado anteriormente con respecto a las compuertas, el sistema no puede operarse siempre de forma automática, sino que requiere poder controlarse por un operario, es decir, poseer modo manual y automático.

Ya se explicó la forma en que el sistema obtiene información del nivel de agua y la interpreta, a continuación se muestra la forma de conocer la posición de las compuertas.

5.2.3.4 Sensores de fin de carrera.

Al abrir las compuertas debe evitarse seguir inyectando aceite a los cilindros luego de que estos se contraen por completo, ya que de lo contrario se puede dañar el grupo hidráulico y/o los cilindros.

Para indicarle al PLC y al usuario el momento en que R1 o R2 llega a la posición de apertura máxima, se decidió utilizar sensores de proximidad inductivos, estos se utilizan en muchos procesos industriales para detectar el “*final de carrera*”. En la figura 5.23 se muestra una fotografía de este dispositivo.



Figura 5.23. Sensor de proximidad inductivo para fin de carrera.

Este modelo se debe instalar de forma tal que detecte la compuerta cuando llega a la posición de máxima apertura mediante una señal en alto; la distancia entre este y la compuerta debe ser menor a 8 mm. En la tabla 5.10 se muestran sus principales características.

Tabla 5.10. Principales características del sensor de proximidad inductivo elegido.

Parámetro	Descripción
Conexión	3 cables, PNP, NO ¹
Tensión de alimentación	10...58 V
Corriente máxima de conmutación	200 mA
Protección contra corto circuito	Sí
Caída de tensión	≤ 2 V
Rango de operación	8 mm
Serie	XS630B1PAL2

¹ El sensor es del tipo normalmente abierto.

Se definieron dos posibles lugares para la ubicación de los sensores, en la figura 5.24 se observan ambas opciones; de las cuales se debe escoger una. En la figura 5.25 se señala con círculos las dos posiciones en una fotografía de la compuerta R2. Los sensores deberán ir colocados en una de las paredes donde se encuentran montadas las compuertas; esta configuración funciona tanto para R1 como para R2.

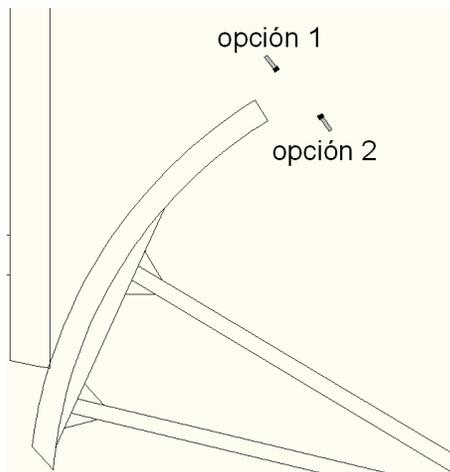


Figura 5.24. Ubicación de los sensores de fin de carrera para las compuertas radiales R1 y R2.



Figura 5.25. Posibles ubicaciones de los sensores en la compuerta R2.

Los sensores de fin de carrera irán conectados a las entradas digitales del PLC, en la sección A.8 se muestra la forma básica de conexión de este tipo de dispositivos a un PLC. En la figura A.4 se observa su conexión al PLC (sensores F1 y F2).

5.2.3.5 Sensor de posición angular Smar TP301.

El sensor Smar TP301 (ver figura 5.26) permite conocer de forma precisa el ángulo de apertura de la compuerta R1. Esto se requirió para desarrollar una lógica de control que evite detener la compuerta en las posiciones que generan la turbulencia mencionada anteriormente, además a futuro puede usarse su información para gobernar la compuerta de forma remota conociendo la apertura de R1 en todo momento. Para aprovechar aún más el sensor, se utilizó para detectar tanto la apertura máxima de la compuerta como el cierre de esta, esto para indicar con una luz al operador cuando la compuerta está abierta o cerrada, además funciona como respaldo del sensor de fin de carrera de R1.



Figura 5.26. Codificador de posición Smar TP301 [21].

Algunas de las características del TP301 se muestran en la tabla 5.11. Para que la lógica de control reconozca las posiciones: “abierta”, “cerrada” y la de “apertura mínima sin turbulencia”, se establecieron 3 constantes en el programa del PLC que corresponden a esas posiciones de la compuerta. Estas se muestran en la tabla 5.12.

Tabla 5.11. Principales características del TP301.

Parámetro	Descripción
Consumo de corriente	20 mA en lazo de 2 hilos
Calibración	Puntos para 4 y 20 mA
Indicador LCD	Opcional
Configuración y diagnósticos	Vía protocolo HART
Rango de medición	30°-120° de rotación
Protección de polaridad invertida	12-45 Vdc
Alimentación	24 Vdc
Tiempo de muestreo	150 ms

Tabla 5.12. Descripción de las constantes relacionadas con la posición de R1.

Constante	Descripción	Valor actual
<i>CCerrada</i>	Porcentaje de apertura de la compuerta cuando está cerrada escalado por un factor de 10.	0
<i>CAbierta</i>	Porcentaje de apertura de la compuerta cuando está abierta escalado por un factor de 10	1000
<i>AperturaCompMin</i>	Porcentaje de apertura mínimo de la compuerta escalado por un factor de 10	200

El sensor puede medir un rango máximo de 120°, y la diferencia de apertura entre la posición abierta y cerrada es de 50°. Dentro del programa se lee el porcentaje de apertura de la compuerta multiplicado por 10, es decir un rango máximo de 0 a 1000. En la tabla 5.12 se muestran los valores que se definieron para el programa, aunque estos pueden variarse de la siguiente manera.

- a. Modificando el acondicionador de señal (ver: *Cambiar OSL y OSH del sensor de posición de la compuerta* en la sección 5.2.2.5)
- b. Asignando los nuevos valores de *CCerrada*, *CAbierta* y *AperturaCompMin* al programa, esto se muestra en la sección 5.2.5.4.

El sensor TP301 incluye un imán que requiere adherirse al eje de la compuerta (ver figura 5.27) el cual gira junto con la misma; el sensor debe ubicarse justo al lado del imán sin que haga contacto con él. En la figura 5.28 se muestra un diagrama de la ubicación del TP301 en la compuerta, y la figura A.4 muestra como conectarlo al PLC (corresponde al bloque llamado Angular).



Figura 5.27. Eje de R1 que gira junto con la compuerta.

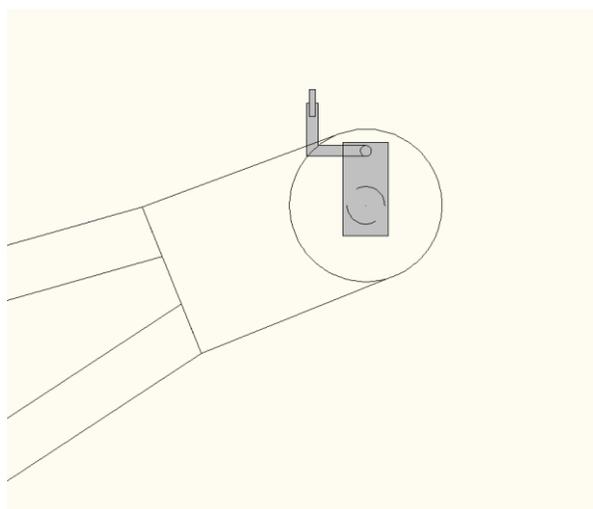


Figura 5.28. Diagrama de la ubicación del codificador de posición TP301 en la compuerta R1.

5.2.3.6 Modo manual.

La toma de agua tiene una importancia tal que no debe ser controlada por un autómata todo el tiempo, por lo que siempre debe existir la posibilidad de que un operario tenga control sobre la toma; además para obras de mantenimiento o pruebas del sistema, se requiere poder controlarlo desde una unidad de mando y señalización. En este modo de trabajo el operador es quien se encarga de controlar la toma según su criterio, por esto la lógica de control no requiere la información de los niveles de agua.

Para desarrollar el algoritmo se debió considerar las posibles combinaciones de señales de entrada al sistema por parte del operador, para luego generar órdenes sobre las compuertas y el limpiarrejas; considerando siempre la posición de las compuertas. Las primeras 6 señales de la tabla 5.13 corresponden a las entradas que el operador tiene acceso para el modo de operación manual. El algoritmo de la figura 5.29 describe la lógica de operación del modo manual; todas las señales involucradas están en la tabla 5.13.

Tabla 5.13. Descripción de las señales para el modo manual.

Señal	Descripción	Comportamiento
A_C_R1	Entrada del interruptor para apertura y cierre de R1	A_C_R1=1: se quiere abrir R1 A_C_R1=0 : se quiere cerrar R1
MoverR1	Entrada del interruptor para mover o detener R1	MoverR1=1: acciona R1 MoverR1=0: detiene R1
Limpia_reja	Entrada del interruptor para activar el limpia rejas	Activa en alto
A_C_R2	Entrada del interruptor para apertura/cierre de R2	Igual que A_C_R1
MoverR2	Entrada del interruptor para mover o detener R2	Igual que MoverR1
Cierre_especial	Entrada del interruptor para cerrar las compuertas por presión	Activa en alto
Cerrar	Salida a las electroválvulas para cerrar por presión las compuertas	Activa en alto
CierreS1	Señal temporal para el cierre especial de R1	Activa en alto. Indica que se quiere cerrar R1 por presión
CierreS2	Señal temporal para el cierre especial de R2	Activa en alto. Indica que se quiere cerrar R2 por presión
LevantaR1	Salida a la electroválvula para abrir R1	Activa en alto
LiberaR1	Salida a la electroválvula para abrir R2	Activa en alto
LevantaR2	Salida a la electroválvula para abrir R2	Activa en alto
LiberaR2	Salida a la electroválvula para cerrar R2	Activa en alto
Acciona_limpia_rejas	Salida para accionar el limpiarrejas	Activa en alto
PosCompuerta	Posición de la compuerta R1	Muestra el porcentaje de apertura instantáneo de R1
FinCarreraR1	Sensor de proximidad para detectar la apertura máxima de R1	Activa en alto
FinCarreraR2	Sensor de proximidad para detectar la apertura máxima de R2	Activa en alto

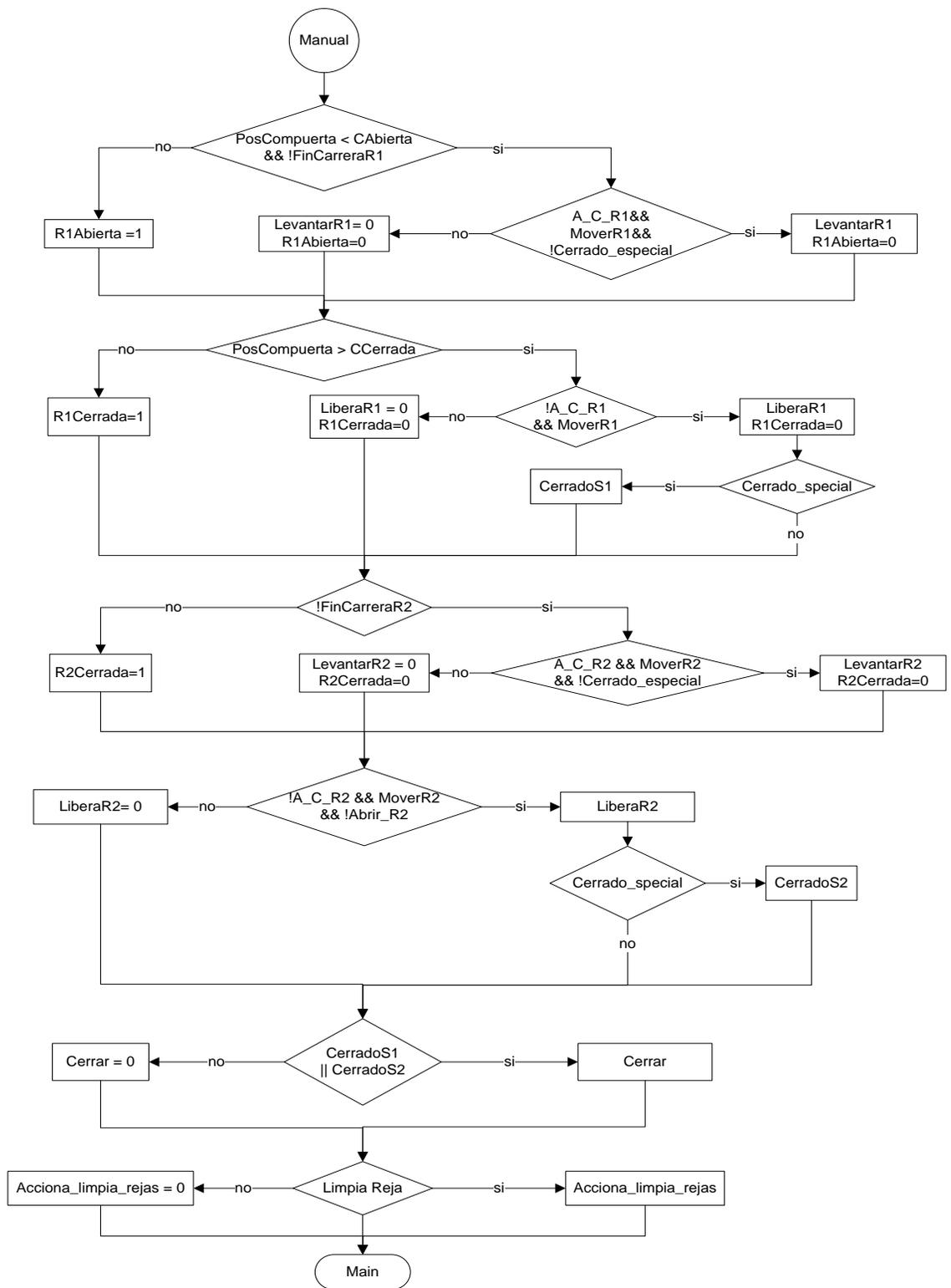


Figura 5.29. Diagrama de flujo para el modo de operación manual.

5.2.3.7 Lógica de control para modo automático.

Básicamente se encarga de ejecutar las acciones según la tabla 5.9, considerando la posición de las compuertas de la siguiente forma:

- a) Si las compuertas están abiertas, se deshabilita la posibilidad de abrir más.
- b) Si R1 está dentro del rango de apertura que genera turbulencia, se evita que se detenga en esa posición.

Este modo de operación solo realiza el cierre de compuertas por peso, y el operador no puede accionarlas; solamente puede encender y apagar el limpiarregas. En la sección 5.2.5.5 se muestra en detalle todos los algoritmos que involucra el modo de operación desde el punto de vista de programación.

5.2.4 Etapa de accionamiento de las compuertas.

Las compuertas de la toma de agua son radiales del tipo taintor, en la sección 3.2.5 se muestra una leve descripción de este tipo de compuerta, y en la sección 5.1.4 se encuentran las razones por la que se eligió diseñar la solución a partir de un sistema hidráulico.

La función de esta etapa es la de abrir y cerrar las compuertas R1 y R2. El diseño de los cilindros hidráulicos, se hizo buscando la fuerza necesaria para levantar las compuertas a una velocidad acorde a las posibilidades de los grupos hidráulicos en el mercado. Por otro lado también debe ser capaz de realizar las maniobras de apertura y cierre de compuertas a partir de las órdenes de un autómata, o de un operador de forma mecánica aún sin corriente eléctrica.

Las compuertas a levantar son:

- a. Compuerta de descarga de fondo (R1).
- b. Compuerta al desarenador (R2).

Las fuerzas más considerables que actúan sobre cada una de las compuertas son:

- a. Peso de la compuerta.
- b. Fuerza debido a la presión del agua.
- c. Fricción debido a los sellos.

En la sección 3.3.1 se muestra la forma de calcular la fuerza debido a la presión del agua. Como las compuertas están sujetas a un eje sobre el cual giran, el momento de inercia total en éste será el indicador del esfuerzo que se requiere para hacerla girar.

El cálculo del momento de inercia se hizo solamente para el peor de los casos, es decir, solo se calculó el esfuerzo máximo. Debido a que la presión es máxima a mayor profundidad, los cálculos de la fuerza debido al agua se hicieron considerando que la compuerta está cerrada, y que existe una columna de agua de altura h sobre la compuerta.

En la figura 5.30 se muestra una imagen de la compuerta de descarga de fondo cerrada. La figura 5.31 muestra, los puntos de acción del peso de la compuerta y las componentes de fuerza debidas a la presión del agua.



Figura 5.30. Compuerta de descarga de fondo R1.

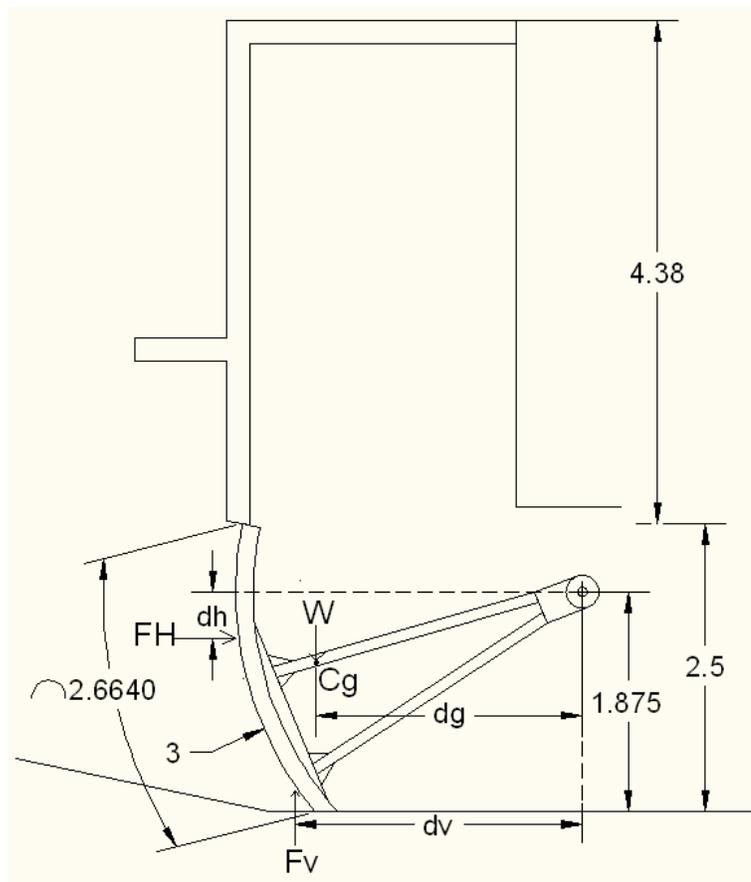


Figura 5.31. Principales fuerzas sobre la compuerta R1.

5.2.4.1 Cálculo de F_H en R1.

El cálculo de F_H y F_v depende de la columna de agua sobre cada compuerta. En la figura 5.32 se muestra un diagrama en 3D de la columna de agua sobre R1. Ahora:

$$h_c = h + s/2 = h + 2.5/2 \text{ [m]}$$

$$F_H = \gamma s w (h + s/2) = 9800 \cdot 2.5 \cdot 2.5 \cdot (h_c) = 61250 h_c \text{ [N]}$$

$$h_p = h_c + s^2 / 12 h_c \text{ [m]}$$

Donde:

h : Altura variable de la columna de agua.

s : Altura de la compuerta.

$\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$: Peso específico del agua.

w : Ancho de la compuerta.

El punto donde se aplica F_H con respecto al eje de la compuerta se le llama d_H y es igual a

$$d_H = (h_p - h) - (s - h_e) \tag{5.7}$$

Donde:

d_H : Es el brazo de palanca de F_H sobre el eje de la compuerta.

h_e : Altura del eje de la compuerta.

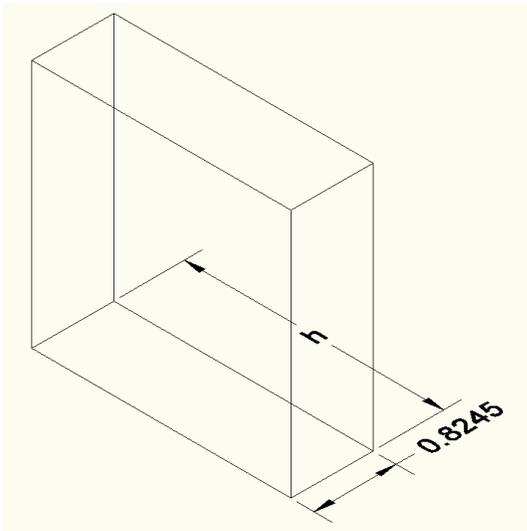


Figura 5.32. Columna de agua sobre la compuerta R1

Ahora lo que nos interesa es el torque que se genera sobre el eje de la compuerta, el cual se calcula como:

$$M_H = F_H d_H \quad [Nm] \quad (5.8)$$

Donde la dirección de M_H es contra las manecillas del reloj (CMR); su comportamiento conforme se varía h se observa en la figura 5.33. El torque que ejerce el agua debido a la fuerza horizontal aumenta conforme se aumenta la columna de agua h .

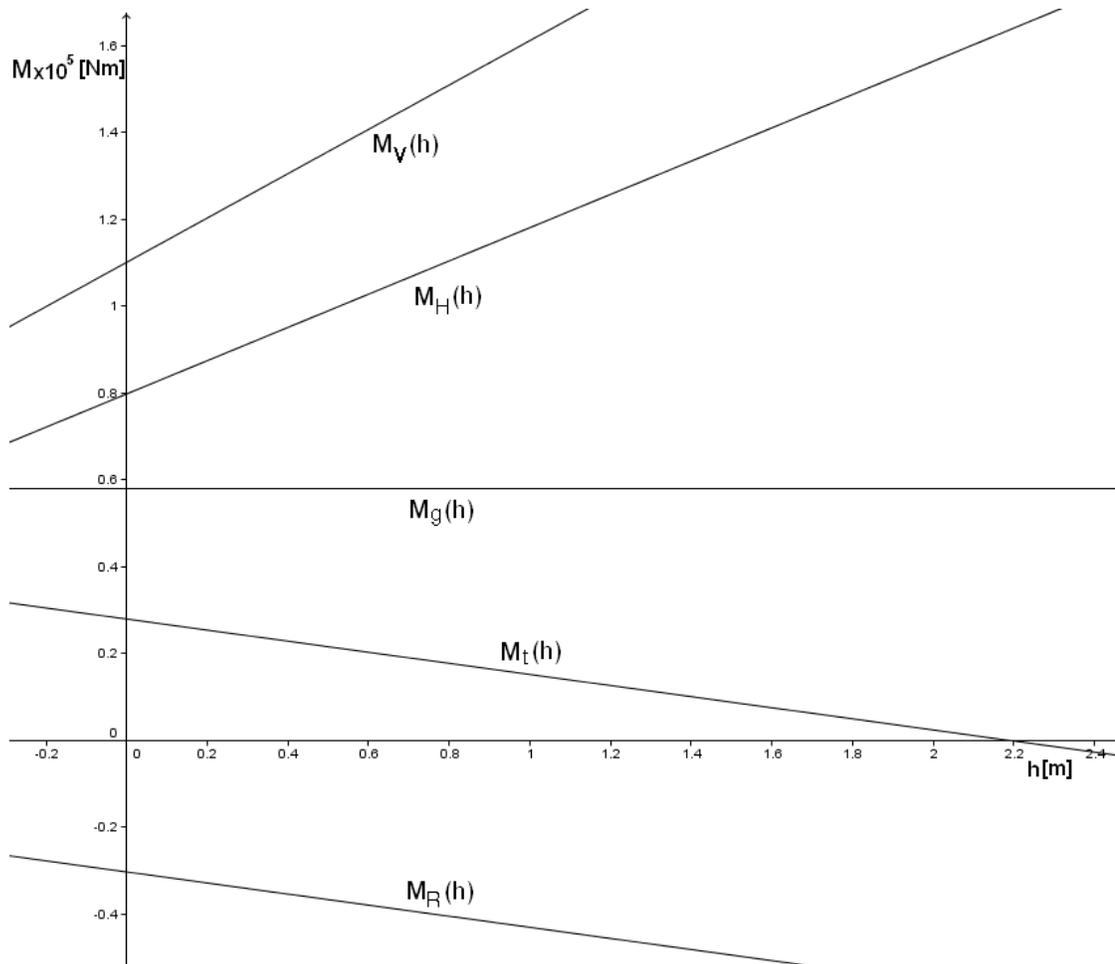


Figura 5.33. Variación de los momentos de inercia con respecto a h en la compuerta R1¹.

En la figura 5.33 se muestran también otras funciones que se explican más adelante, las cuales corresponden a:

M_g : Torque debido al peso.

$$M_t = M_H + M_g - M_V$$

$$M_R = M_H - M_V$$

¹ . La magnitud real del eje vertical debe multiplicarse por 1×10^5 , además las magnitudes positivas indican un torque que contribuye a cerrar la compuerta (CMR).

5.2.4.2 Cálculo de F_v en R1.

El volumen de agua desplazado por la compuerta se obtuvo mediante herramientas de *software*, este se observa en la figura 5.34.

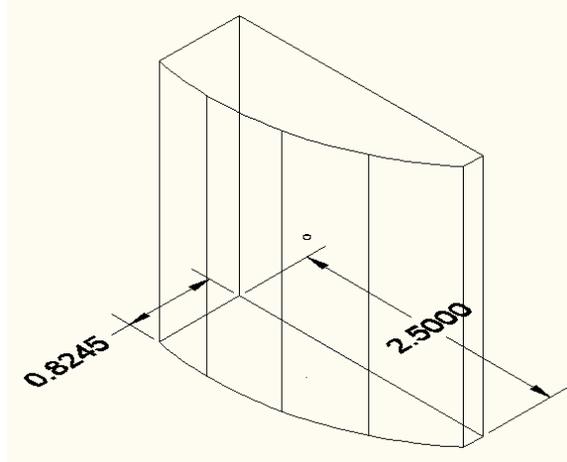


Figura 5.34. Volumen de agua evacuado por la compuerta R1

A partir de las ecuaciones (3.5), (3.6), las dimensiones de la compuerta y de la columna de agua, se obtiene que:

$$F_v = \gamma(\text{volumen})$$

$$\text{volumen} = \text{volumen de compuerta} + \text{volumen de columna}$$

$$\text{volumen} = 4.4575 \text{ m}^3 + s \cdot h \cdot a_c = 4.4575 \text{ m}^3 + 2.5 \text{ m} \cdot h \cdot 0.8245 \text{ m}$$

$$\text{volumen} = 2.06 \text{ m}^2 \cdot h + 4.4575 \text{ m}^3$$

$$F_v = 9800 \cdot \text{volumen} [N] \text{ hacia arriba}$$

Donde:

$a_c = 0.8245 \text{ m}$: Ancho de la columna de agua y de la superficie curva.

Para calcular el punto de acción de F_v se utiliza la ecuación (3.7), que toma en cuenta las áreas de la cara del plano xy de los volúmenes y sus centroides. El área A_1 se obtuvo mediante herramientas de *software* y es de 1.783 m^2 , el área A_2 depende de h y los centroides de cada superficie son: $x_1 = 0.4413 \text{ m}$ y $x_2 = 0.4122 \text{ m}$, medidos desde la componente vertical derecha de la columna de agua. El centroide está dado por

$$\text{Centroide} = \frac{1.783 \cdot 0.4413 + 0.8245 \cdot h \cdot 0.4122}{1.783 + 0.8245 \cdot h} = \frac{0.787 + 0.340 \cdot h}{1.783 + 0.8245 \cdot h} \text{ [m]}$$

Luego d_v se calcula como:

$$d_v = R' - (a_c - \text{centroide}) \quad (5.9)$$

Donde:

d_v : Brazo de palanca de F_v respecto al eje de la compuerta.

R' : Distancia en el eje x desde el eje de la compuerta hasta su punto más alto.

Sustituyendo en la ecuación (5.9) se obtiene:

$$d_v = 2.941 - (0.8245 - \text{centroide}) \text{ [m]}$$

De igual forma que para F_H , lo que nos interesa es el torque M_v que le ejerce F_v al eje de la compuerta; en la figura 5.33 se observa la función que lo representa, y se calcula a partir de la ecuación (5.8) utilizando las componentes de fuerza verticales.

5.2.4.3 Peso de R1.

$$W = mg \text{ [N] hacia abajo} \quad (5.10)$$

Donde:

m : Es la masa de la compuerta.

g : Es la aceleración de la gravedad.

Con la ecuación (5.10) y las características mecánicas de la compuerta se obtiene entonces que:

$$mg = 2327 \cdot 9.8 = 22804.6 \text{ N hacia abajo}$$

El centro de gravedad de la compuerta tomando como referencia el eje de la misma se ubica en:

$$C_g = 2.553x - 0.730y \text{ [m]}$$

La palanca generada por el centro de gravedad respecto al eje de la compuerta se llama d_g , y tiene un valor de 2.553 m cuando la compuerta está cerrada.

El torque M_g en el eje de la compuerta debido a su peso cuando está cerrada, se observa en la figura 5.33, este es constante ya que no depende de la columna de agua y tiene un valor de:

$$M_g = m \cdot g \cdot d_g = 22804.6 \cdot 2.553 = 58220.14 \text{ [Nm] hacia abajo}$$

5.2.4.4 Fricción debido a los sellos laterales en R1.

Para disminuir las fugas de agua por los bordes de la compuerta se utiliza un sello de tipo nota musical. La fricción del sello se calcula de la siguiente manera.

$$F_s = \mu_s Sl \text{ [N]} \tag{5.11}$$

$$S = \frac{3\delta EI}{d^3} \quad [N/m] \quad (5.12)$$

Donde:

F_s : Fuerza debido a la fricción de los sellos.

$\mu_s = 1.0$: Coeficiente de fricción estático para Acero-elastómero.

l : Longitud del arco de la compuerta.

S : Fuerza por unidad de longitud inducida por la presencia del sello debido a su compresión.

$\delta = 0.07$: Porcentaje de elongación del material sellado.

$E = 567.42 \frac{N}{cm^2}$: Módulo de elasticidad del sello.

$I = 14.6 \text{ cm}^4$: Inercia del sello.

$d = 6 \text{ cm}$: Longitud libre y útil del sello.

Sustituyendo en (5.11) y (5.12).

$$S = \frac{3 \cdot 0.07 \cdot 567.42 \cdot 14.6}{6^3} = 805.42 \text{ N/m}$$

$$F_s = 1 \cdot 805.43 \cdot 2.664 = 2145.64 \text{ N}$$

Debido a que se utiliza un sello de cada lado de la compuerta entonces la fuerza de fricción total es:

$$2F_s = 4291.28 \text{ N En contra de la dirección del movimiento}$$

5.2.4.5 Momento de inercia máximo en R1.

Analizando el comportamiento de los momentos de inercia debido a la presión del agua y el peso de la compuerta en la figura 5.33, se identifica que el momento de inercia crítico a vencer se da cuando no hay agua en la toma; por lo que se calcula considerando solo el peso de la compuerta y la fricción en los sellos, esta deducción se encuentra más detallada en el análisis de resultados.

El torque máximo debido al peso de la compuerta, se da cuando esta se levanta hasta el punto en que el centro de gravedad genera el brazo de palanca máximo, el cual es igual a

$$d_{gmax} = \sqrt{2.553^2 + 0.730^2} = 2.655 \text{ m}$$

El momento de inercia en el eje tomando como positiva la dirección CMR es

$$\sum M_o = mgd_{gmax} + 2F_s R \quad [Nm] \quad (5.13)$$

Donde:

R : Radio de la compuerta¹

Sustituyendo en (5.13).

$$\sum M_o = 22804.6 \cdot 2.6553 + 2145.64 \cdot 3 = 73427.3 \text{ N CMR}$$

¹ El brazo de palanca de las fuerzas de fricción es igual al radio de la compuerta, esto porque los sellos se ubican en la pantalla de la compuerta.

5.2.4.6 Peso de la compuerta R2.

Esta es la compuerta que comunica la toma con el desarenador. Debido a su tamaño y peso la fuerza requerida para levantarla es menor que para R1. En la figura 5.35 se muestra una fotografía de esta compuerta cuando está abierta.



Figura 5.35. Compuerta al desarenador (R2).

El procedimiento para los cálculos de las fuerzas en esta compuerta es el mismo que para R1, por eso se presentan de forma resumida. Solamente se muestra el cálculo para el momento de inercia máximo, el cual no toma en cuenta la presión que ejerce el agua. En la figura 5.36 se muestran las dimensiones de la compuerta R2 y la ubicación del centro de gravedad.

El peso de la compuerta es:

$$mg = 1963 \cdot 9.8 = 19237.4 \text{ N hacia abajo}$$

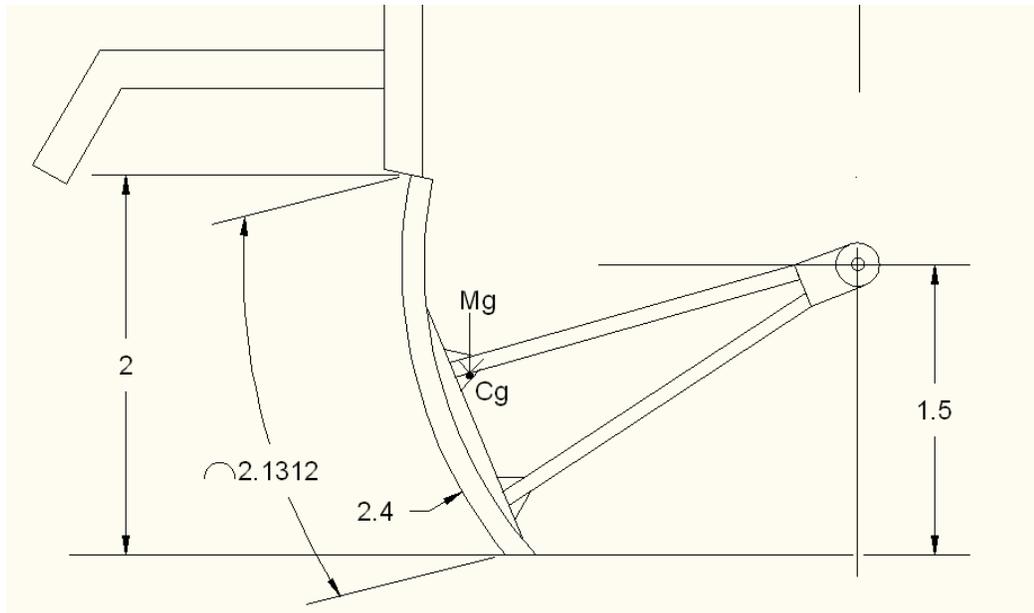


Figura 5.36. Fuerzas aplicadas sobre la compuerta R2

El torque máximo debido al peso de la compuerta se da al subirla hasta cierto punto. Su centro de gravedad está ubicado en $C_g = (2.042, -0.584)$ con R2 cerrada; la palanca máxima d_{gmax} que puede llegar a generar viene dada por:

$$d_{gmax} = \sqrt{2.042^2 + 0.584^2} = 2.12 \text{ m}$$

5.2.4.7 Fricción debido a los sellos laterales en R2.

Utilizando las ecuaciones (5.11) y (5.12) se procede de la misma manera que para la compuerta R1, la única variante es la longitud del arco de R2 por lo que S se mantiene constante. Con esto se obtiene que

$$F_s = 1 \cdot 805.43 \cdot 2.1312 = 1716.514 \text{ N}$$

Debido a que se utiliza un sello de cada lado de la compuerta entonces la fuerza de fricción total es

$$2F_s = 3433.027 \text{ N en contra de la dirección del movimiento.}$$

5.2.4.8 Momento de inercia máximo en R2

El momento máximo en el eje se calcula con la ecuación (5.13). Como el radio de la compuerta es $R = 2.4 \text{ m}$, se obtiene que

$$\sum M_o = mg \cdot d_{gmax} + 2F_S \cdot R \text{ [Nm]}$$

$$\sum M_o = 19237.4 \text{ N} \cdot 2.12 \text{ m} + 3433.03 \text{ N} \cdot 2.4 \text{ m} = 49097.98 \text{ Nm CMR}$$

5.2.4.9 Cilindros hidráulicos.

El accionamiento de las compuertas R1 y R2 se modernizará por medio de la instalación de un sistema basado en cilindros hidráulicos, esto debido a que la empresa lo prefiere y en casi la totalidad de centrales hidroeléctricas las compuertas se controlan con dispositivos hidráulicos.

Los cilindros hidráulicos para esta función deben ser: de doble efecto, con vástago de acero inoxidable cromado y con presiones de trabajos que oscilan entre los 60 y 120 bar.

Las compuertas radiales tienen la característica de poder bajar por su propio peso. La lógica de control de los cilindros en condiciones normales debe inyectar aceite para levantar la compuerta y luego dejar que el peso de la compuerta devuelva el aceite a tanque. La necesidad de cilindros de doble efecto se da porque podría requerirse cerrar las compuertas de emergencia aún con mucha agua en la toma, y en este caso podría requerirse cerrarla inyectando aceite.

5.2.4.10 Grupo hidráulico.

El grupo hidráulico utiliza doble motobomba y bomba manual de emergencia. La última es completamente necesaria, ya que de no tenerla, una falla en el abastecimiento eléctrico dejaría las compuertas completamente inhabilitadas y podría causar serios daños a la toma de agua en una avenida grande. El grupo hidráulico debe tener las siguientes características:

- a. Filtros de succión.
- b. Válvulas de retención en las motobombas y de retorno al tanque.
- c. Filtro de retorno a tanque.
- d. Indicadores de temperatura y de nivel eléctrico.
- e. Respiradero c/silicagel.
- f. Boca de carga presurizada.
- g. Caja de bornes.
- h. Válvulas limitadoras de presión y manómetros en la salida de las motobombas.
- i. Válvulas reguladoras de caudal para cada válvula direccional.
- j. Válvula limitadora de presión para cada válvula direccional.
- k. Válvula limitadora de presión con retorno a tanque para la salida de las motobombas.
- l. Válvulas de paracaídas para cada cilindro hidráulico.
- m. Motobombas de 1740 rpm - 440 V-60 Hz.

5.2.4.11 Condiciones para la ubicación del cilindro hidráulico.

El momento ejercido por los cilindros sobre la compuerta se calcula de la siguiente forma:

$$M_o = F_p L \sin \theta \quad [Nm] \quad (5.14)$$

Donde:

M_o : Momento en el eje de la compuerta.

F_p : Fuerza del cilindro.

L : Distancia desde el eje de la compuerta hasta donde se apoya el cilindro.

θ : Ángulo entre el brazo de la compuerta y el cilindro.

Acomodando la ecuación (5.14) para despejar F_p se obtiene:

$$F_p = \frac{M_o}{L \operatorname{sen} \theta} \quad [N]$$

La menor fuerza se realizará cuando $\operatorname{sen} \theta = 1$ y con el mayor L posible; la primera condición implica $\theta = 90^\circ$. Lamentablemente no se pueden cumplir tan fácilmente esas condiciones ya que también se debe considerar que:

- a. La posición y el tamaño de los cilindros pueda abrir y cerrar por completo la compuerta, considerando que cuando el cilindro está contraído es aproximadamente la mitad que cuando está extendido.
- b. El cilindro no se interponga en el camino de la compuerta durante la apertura.
- c. Conforme se aumenta el tamaño del cilindro aumenta el costo.
- d. El lugar de anclaje pudiera ser implementado en la realidad ya que requiere cierta área en la pared para su correcta adaptación.

5.2.4.12 Cilindros hidráulicos para R1

Considerando lo anterior la ubicación se limitó mucho. En la figura 5.37 se muestra la posición de los cilindros hidráulicos definida para la compuerta R1.

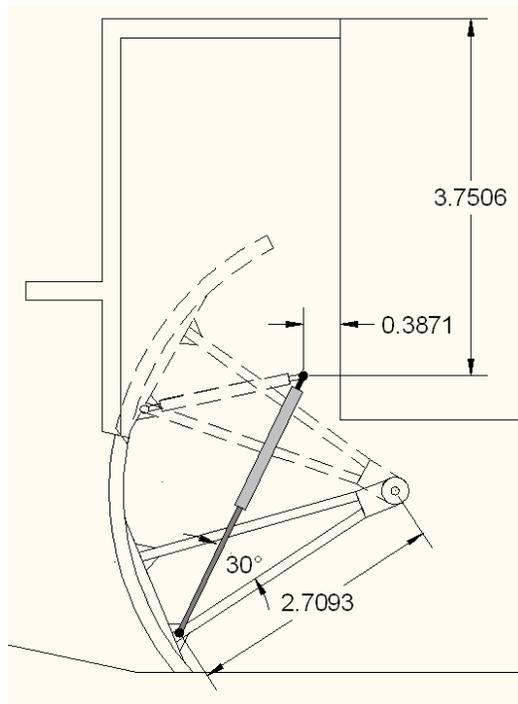


Figura 5.37. Ubicación de los cilindros hidráulicos en la compuerta R1

Con la ubicación definida, se obtuvo el ángulo θ de la posición de la compuerta que requiere mayor esfuerzo (cuando la compuerta se levanta hasta cierto punto). Sustituyendo los valores en la ecuación (5.14) se obtuvo

$$F_p = \frac{73427.30}{2.709 \cdot \text{sen}(28^\circ)} = 57728.62 \text{ N}$$

Como se levanta cada compuerta con dos cilindros hidráulicos, se divide la fuerza entre ellos en partes iguales, además se le agrega un 30% extra de esfuerzo debido a:

- a. Posibles sólidos como piedras que puedan generar fricción e interponerse a la apertura de la compuerta.
- b. Peso de los cilindros.
- c. Se desea levantar la compuerta con cierta facilidad.
- d. Factor de seguridad.

Con eso la magnitud de la fuerza F_c de cada cilindro para la compuerta R1 es:

$$F_c = \frac{57728.62 + 30\%}{2} = 37523.60 \text{ N}$$

La figura 5.38 muestra la longitud de los cilindros para la compuerta R1.

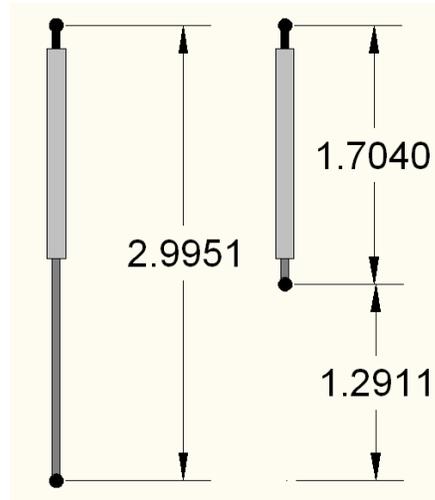


Figura 5.38. Longitud de los cilindros hidráulicos para la compuerta R1.

5.2.4.13 Cilindros hidráulicos para R2.

Para la compuerta R2 se hizo el mismo análisis que para R1. Las figuras 5.39 y 5.40 muestran la ubicación y longitud de los cilindros hidráulicos respectivamente. La fuerza necesaria es entonces igual a

$$F_p = \frac{49096.98}{1.5438 \cdot \text{sen}(51^\circ)} = 40922.41 \text{ N}$$

$$F_c = \frac{40922.41 + 30\%}{2} = 26599.57 \text{ N}$$

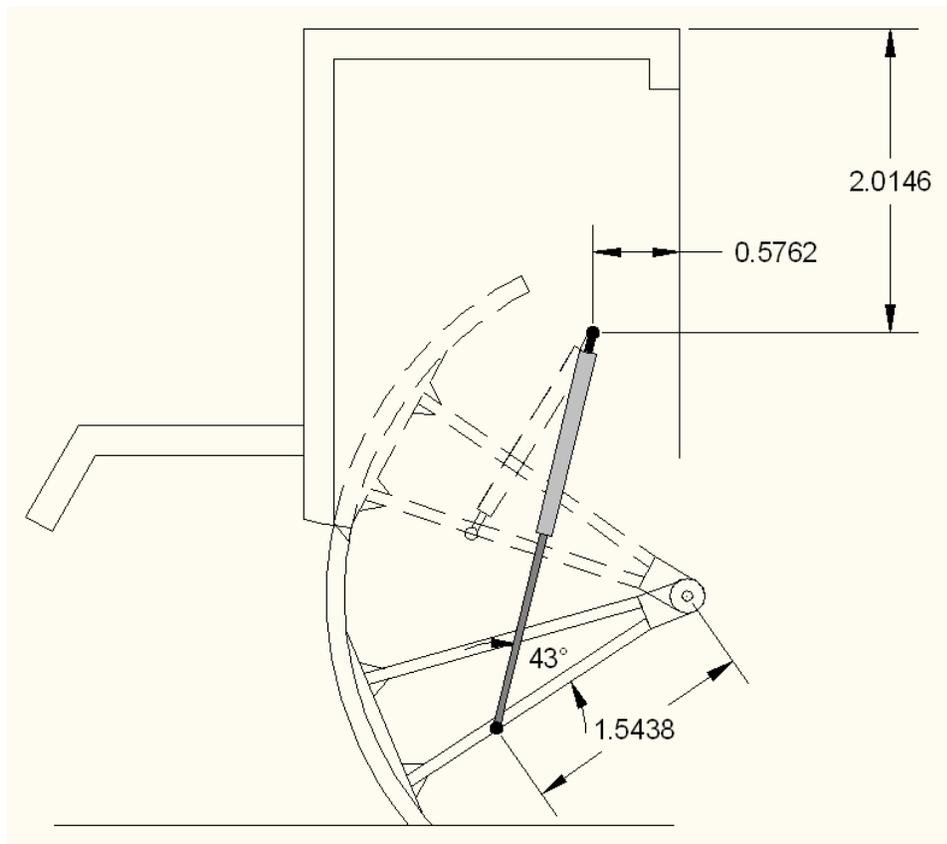


Figura 5.39. Ubicación de los cilindros hidráulicos para la compuerta R2.

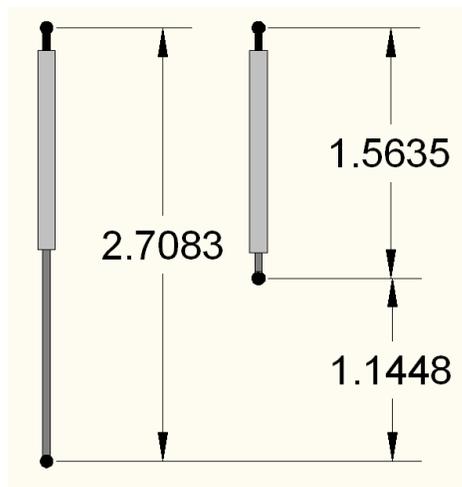


Figura 5.40. Longitud de los cilindros hidráulicos para la compuerta R2.

Conociendo la longitud de los cilindros y la fuerza que requieren ejercer, se pueden calcular el resto de especificaciones. Se debió tomar ciertas consideraciones para poder dimensionarlos, como por ejemplo, la presión de trabajo será de $P = 100$ bar ya que es muy frecuente en la mayoría de grupos hidráulicos; el diámetro del vástago será de 50 mm por recomendación de los mecánicos de la empresa para que no llegue a doblarse. Con las consideraciones anteriores puede calcularse el diámetro interno de la camisa.

A partir de la ecuación (5.15) se determinó el área de la región efectiva al contraer el cilindro.

$$A = \pi \left[\left(\frac{D_c}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_v}{2} \right)^2 \right] \quad (5.15)$$

Donde:

D_c : Diámetro interno de la camisa.

D_v : Diámetro del vástago

A partir de las ecuaciones (5.15) y (5.16) se despeja D_c con lo que se obtiene la ecuación (5.17).

$$A = F_c / P \quad (5.16)$$

$$D_c^2 = 4 \left[\left(\frac{D_v}{2} \right)^2 + \frac{F_c / P}{\pi} \right] \quad (5.17)$$

Sustituyendo los valores definidos para los cilindros de R1 en la ecuación (5.17) se obtiene:

$$\left[\left(\frac{50 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 + \frac{37523.60 / 100 \times 10^5}{\pi} \right] \cdot 4 = Dc^2 \Rightarrow Dc = 73.50 \text{ mm}$$

De igual forma se calcula para R2 obteniendo:

$$\left[\left(\frac{50 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 + \frac{26599.57 / 100 \times 10^5}{\pi} \right] \cdot 4 = Dc^2 \Rightarrow Dc = 63.34 \text{ mm}$$

En las tablas 5.14 y 5.15, se muestran las especificaciones para el diseño de todos los cilindros hidráulicos según los cálculos realizados y recomendaciones para estos dispositivos.

Tabla 5.14. Especificaciones de los cilindros hidráulicos de ambas compuertas.

Especificaciones Comunes	
Presión de trabajo	100 bar
Fluido hidráulico	Aceite mineral ISO VG 68-40°C CST
Vástago	Acero inoxidable cromado
Modo de operación	Doble efecto
Diámetro del vástago	50 mm

Tabla 5.15. Características de los cilindros para cada compuerta.

Compuerta R1		Compuerta R2	
Numero de cilindros	2	Numero de cilindros	2
Carrera	1291 mm	Carrera	1145 mm
Diámetro interno de la camisa	73.50 mm	Diámetro interno de la camisa	63.34 mm
Área al contraer	22.80 cm ²	Área al contraer	11.87 cm ²
Fuerza	37523.60 N	Fuerza	26599.57 N
Velocidad promedio	0.3 m/s	Velocidad promedio	0.3 m/s
Tiempo aprox. al contraerse	4 min, 18 s	Tiempo aprox. al contraerse	3 min, 48 s

5.2.4.14 Esquema hidráulico.

En la sección 5.2.4.10 se muestran las características que debe tener el grupo hidráulico. A continuación se muestra el diseño básico del esquema hidráulico para lograr las funciones de apertura y cierre de compuertas de forma correcta.

Características principales.

- a. Válvulas con accionamiento tanto eléctrico como mecánico para que puedan controlarse por el PLC o de forma manual por un operario.
- b. Debe poder extender los cilindros ya sea mediante presión o permitiendo el retorno del fluido al tanque por el peso de la compuerta.
- c. Debe poder retener cualquier posición de los cilindros al contraerse y al extenderse.

En la figura 5.41 se muestra un esquema hidráulico básico, que se utilizó para comprobar la lógica de operación del sistema hidráulico mediante simulaciones por computadora.

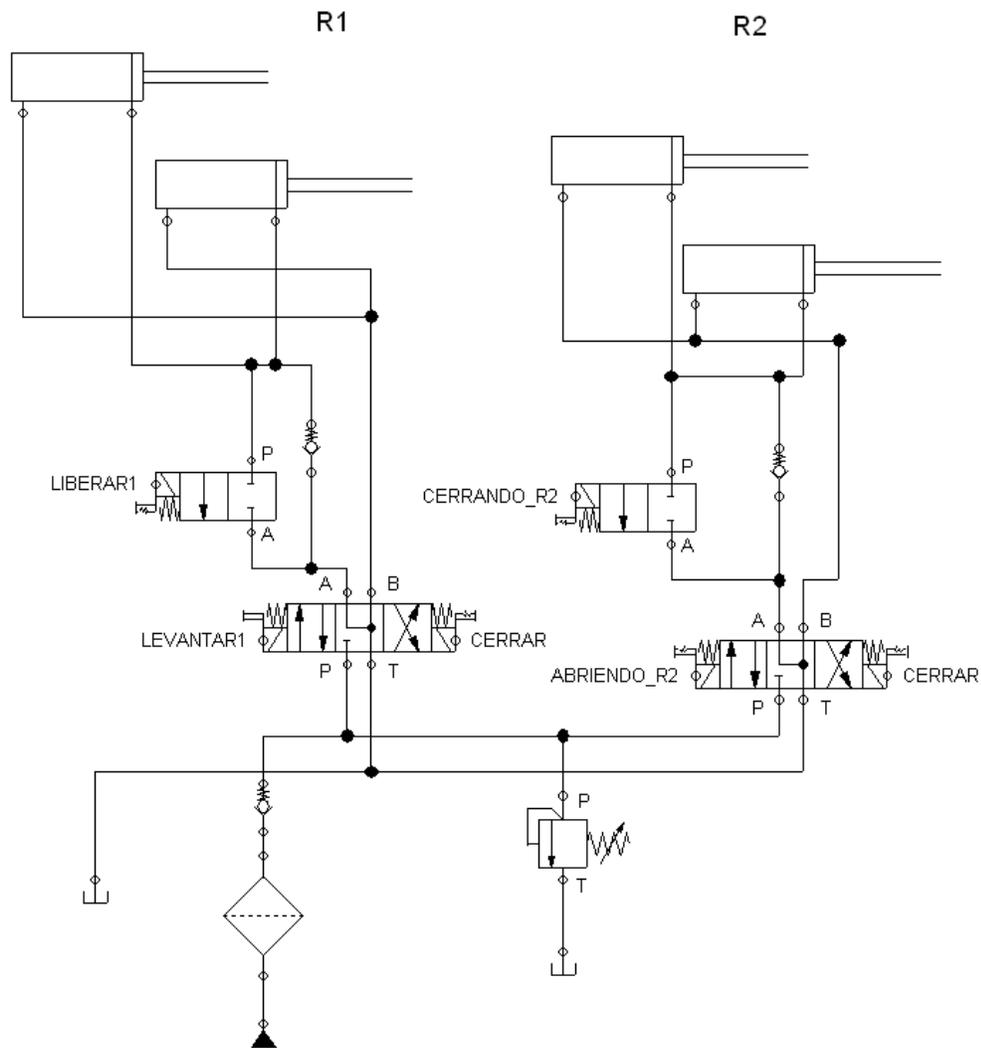


Figura 5.41. Esquema hidráulico básico utilizado para comprobar la lógica de accionamiento de las compuertas.

El diseño del grupo hidráulico debe apegarse a los tipos de válvulas y accionamientos que se muestran en la figura 5.41, además del resto de características ya mencionadas. Los proveedores de este tipo de productos ya manejan también los requerimientos mínimos que se necesitan para el control de cilindros en centrales hidráulicas.

Las válvulas serán accionadas tanto por el PLC como por el operador; la forma de conexión de estas se muestra en la sección A.7 y en la figura A.4.

5.2.4.15 Caudal de trabajo.

El caudal de aceite que se inyecta define la velocidad con que se acciona el cilindro, la cual se desea de 0.3 m/min. El caudal necesario para esta tarea se calculó por medio de la ecuación (3.11), donde A corresponde al área para contraer el cilindro. Sustituyendo en la ecuación se obtiene para R1:

$$Q = 22.80 \text{ cm}^2 \cdot \frac{0.30 \text{ m}}{\text{min}} = 0.68 \text{ l/min}$$

Y para R2 se requiere:

$$Q = 11.87 \text{ cm}^2 \cdot \frac{0.30 \text{ m}}{\text{min}} = 0.36 \text{ l/min}$$

Entonces el caudal total necesario tomando en cuenta que son 2 cilindros por compuerta es de 4.43 l/min.

5.2.5 Programa para PLC.

Para controlar todo el sistema e interconectar todas la etapas de la solución se seleccionó un PLC Simatic S7-200 con un CPU 224, además del módulo de entradas analógicas EM 231 que se le agrega al autómatas. En sección 5.1.5 se muestran las razones de la escogencia de estos dispositivos.

En la figura 5.42 se muestra el diagrama de bloques de segundo nivel para la solución. Principalmente se puede apreciar que existe un controlador (PLC) conectado a varias etapas. Existe la etapa que se encarga de la medición de los niveles, la etapa de mando y señalización (botonera), y la etapa de potencia que acciona las compuertas. A partir del diagrama se pueden identificar las señales que interconectan cada etapa.

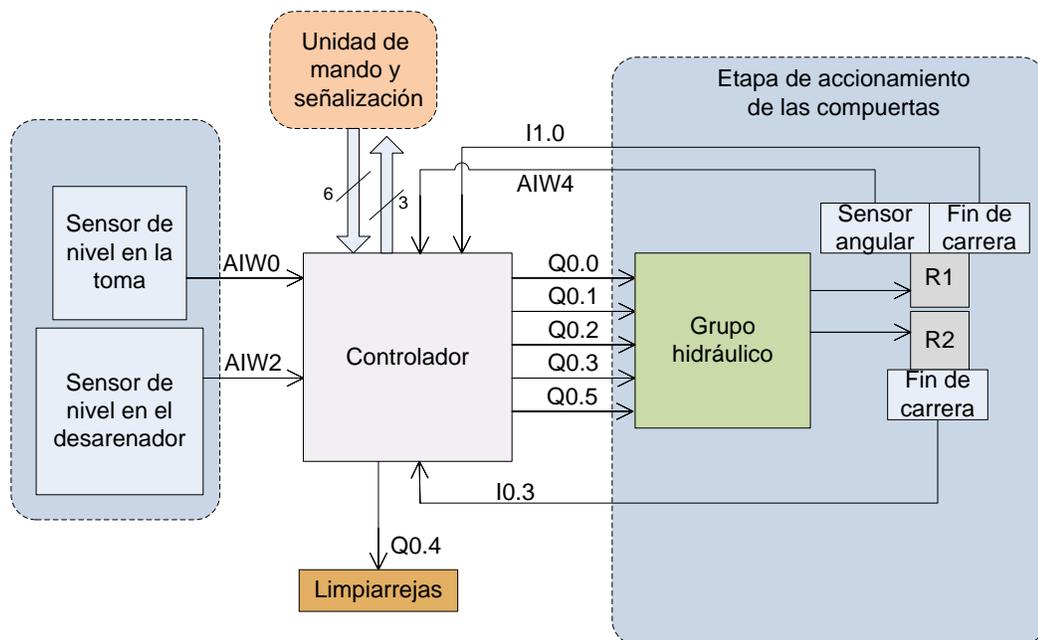


Figura 5.42. Diagrama de bloques de segundo nivel de la solución.

En la tabla 5.16 se muestra el número requerido de entradas y salidas del PLC. En la sección A.3 se muestra en detalle la descripción de cada señal.

Tabla 5.16. Cantidad de entradas y salidas necesarias para el PLC.

Entradas analógicas	3
Entradas digitales	9
Salidas digitales	9

5.2.5.1 Configuración del módulo EM 231

Se había pensado en hacer una rutina para calcular un promedio de varias lecturas de los sensores de nivel, esto para que un posible oleaje u objeto flotante no fuera a afectar la medición haciéndola oscilar constantemente, sin embargo el EM 231 ya posee internamente un mecanismo encargado de hacer esto, con lo cual también logra eliminar el efecto del ruido que se introduce en el proceso. En la sección A.6 se muestran los pasos a seguir para habilitar la función.

5.2.5.2 Diseño del programa para el PLC.

La implementación de los algoritmos se hizo utilizando el lenguaje KOP también conocido como lenguaje de escalera, antes de la escritura de código se realizó una etapa de diseño por medio de diagramas de flujo para definir la secuencia del programa. Este tipo de diagramas se utilizó para facilitar la comprensión y permitió realizar pruebas en el diseño para llegar a la solución final.

Para segmentar la lógica del programa de acuerdo a su función, facilitar su revisión y reutilizar código, se realizaron diferentes rutinas que ayudaron a tener un programa estructurado. A continuación se explican las rutinas del programa a partir de los diagramas de flujo que se elaboraron.

5.2.5.3 Rutina *Main*

En la figura 5.43 se muestra el diagrama de flujo de la rutina *Main* del programa. Esta es la rutina principal del programa, primero llama solamente una vez a la subrutina *InicializarConst*, luego entra en un ciclo donde:

- a. Se lee la entrada analógica (*AIW4*) que obtiene la posición de la compuerta R1, y por medio de la rutina *leer_sensor_posicion*, se acondiciona la señal para que represente un valor entendible de la apertura de la compuerta (porcentaje de apertura), el cual se almacena en *PosCompuerta*.
- b. Se verifica el modo de operación para trabajar en modo manual o automático.
- c. En modo manual se ejecutan las rutinas *Manual* y *Resetear*, mientras que en modo automático se ejecutan *Auto* y *GenerarSalidas*.
- d. Se vuelve a iniciar el ciclo.

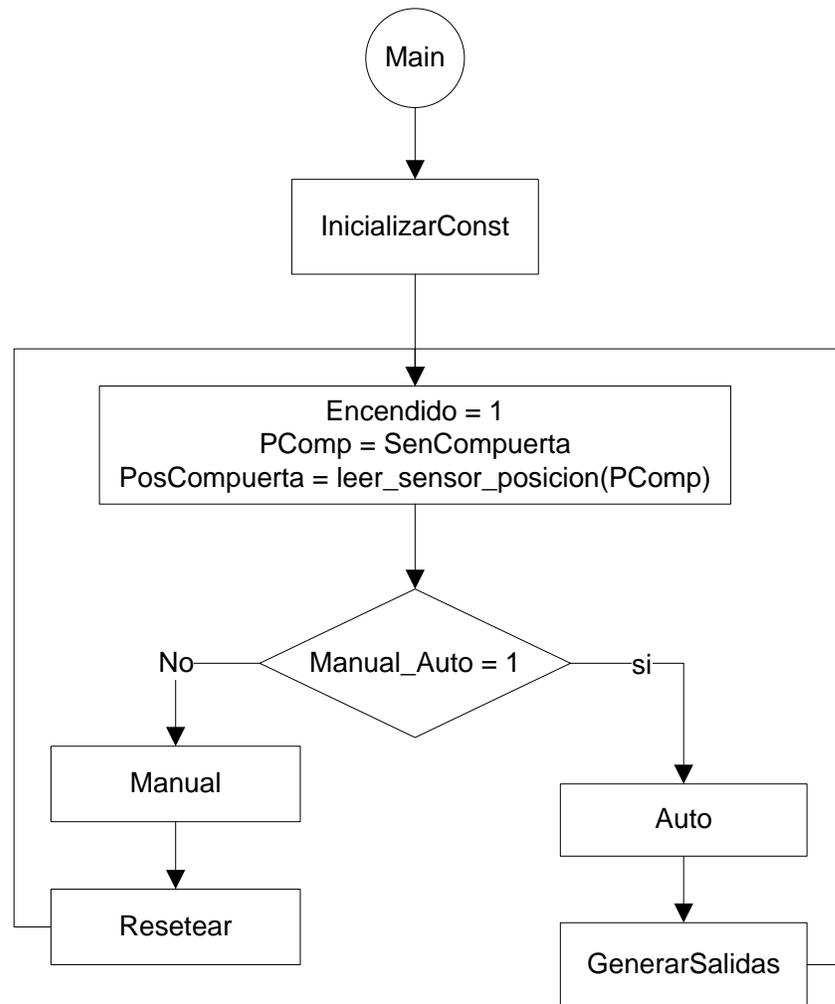


Figura 5.43. Diagrama de flujo de la rutina *Main*.

A continuación se menciona la función básica de cada subrutina.

InicializarConst: Se almacenan en constantes los valores que se utilizan para definir niveles de agua, posiciones de R1, acondicionadores de señal, entre otros. La rutina se explica en detalle en la sección 5.2.5.4.

Auto: Lee las entradas analógicas de los sensores de nivel y asigna las acciones a realizar de acuerdo a la tabla 5.9. Esta rutina se muestra detalladamente en la sección 5.2.5.5.

Generar Salidas: Se encarga de actualizar las salidas del PLC según las acciones definidas por la rutina *Auto*, en la sección 5.2.5.8 se explica en detalle.

Manual: Ejecuta las acciones introducidas por el operador desde una botonera para tener control total del sistema. La rutina se explica en la sección 5.2.5.9.

Resetear: Reinicia los valores de las variables que determinaron que acciones a realizar en modo automático. La rutina se explica en la sección 5.2.5.11.

Como se puede observar en la figura 5.43, esta rutina funciona de forma infinita mientras que el PLC esté encendido. La razón por la cual se lee el codificador de posición de R1 antes de ver el modo de operación, es porque tanto en el modo manual como automático se utiliza la lectura de la posición de R1, de esta forma se escribe menos código.

5.2.5.4 Subrutina *InicializarConst*

Esta subrutina se utiliza para asignar los valores correspondientes a la mayoría de constantes que se utilizan en el código del programa; el algoritmo que describe la subrutina se muestra en la figura 5.44. Una persona autorizada y capacitada para la programación de controladores lógicos, que además tenga conocimiento del proceso en la toma de agua, podría variar la rutina si se llega a determinar que se puede mejorar la respuesta del sistema. En la tabla A.1 se muestra la descripción y valor asignado a cada constante. En la sección A.5 se explica la forma de cambiar el valor de una constante.

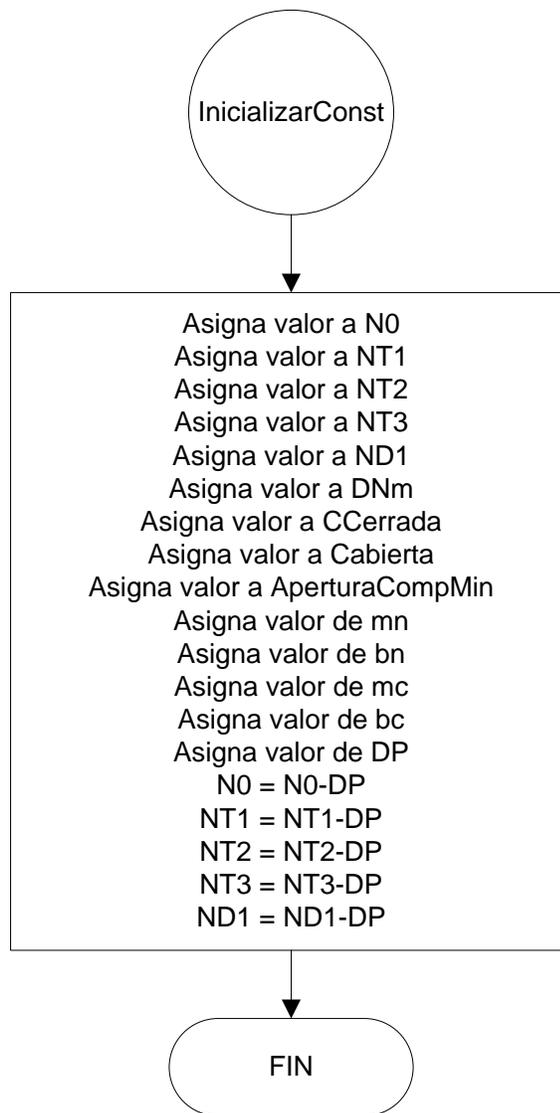


Figura 5.44. Diagrama de flujo de la rutina *InicializarConst*.

5.2.5.5 Subrutina *Auto*

El diagrama de flujo del algoritmo se muestra en la figura 5.45. En el inicio del algoritmo se leen las entras analógicas de los sensores de nivel, se pasan como parámetro a la subrutina *leerSensorNivel*, la cual acondiciona la señal para que represente la distancia entre el sensor y el nivel de agua en milímetros; el valor final del nivel en la toma se guarda en *Nivel1*, y el del desarenador en *Nivel2*.

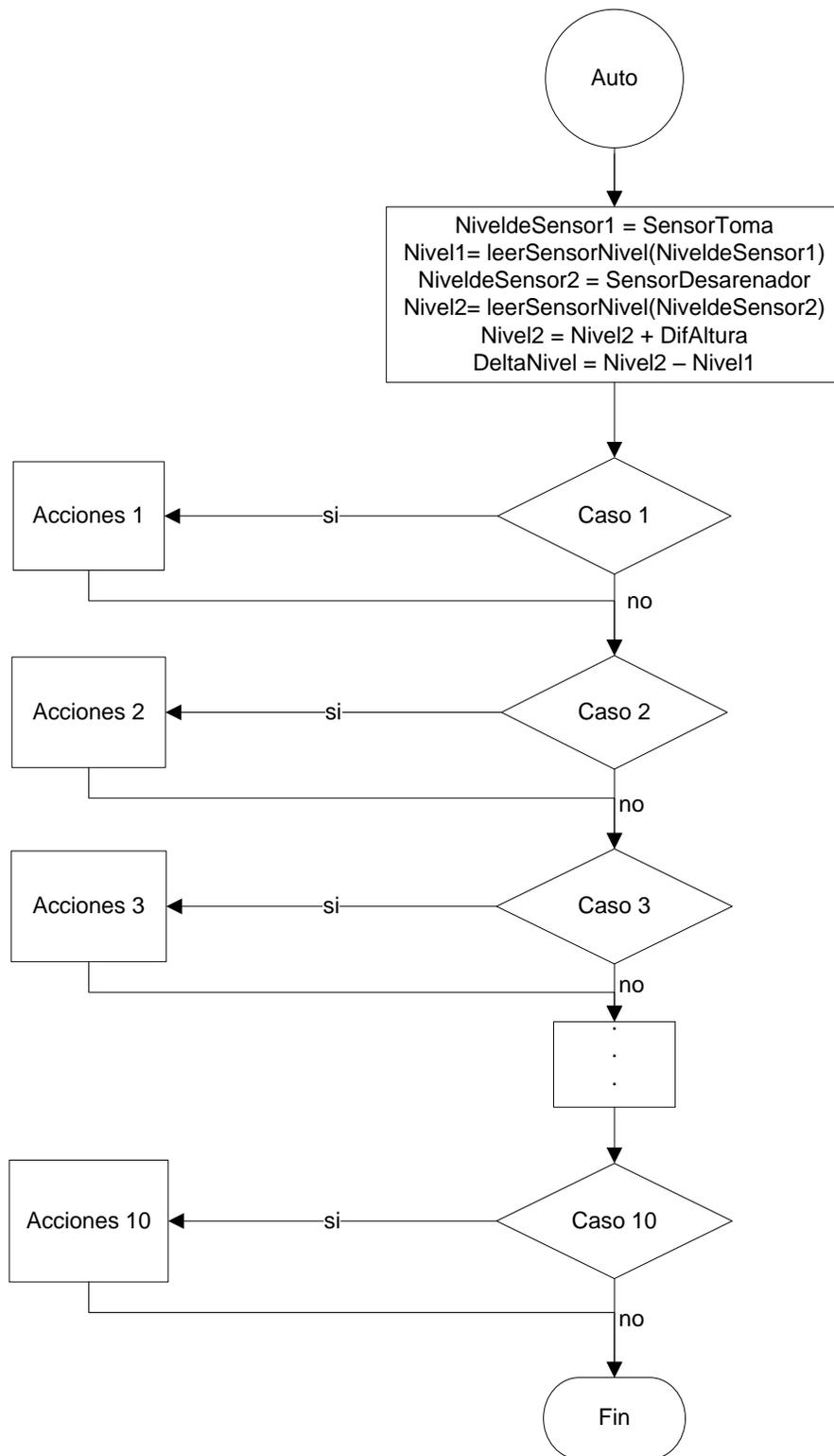


Figura 5.45. Diagrama de flujo de la rutina auto para el PLC.

El valor de *Nivel2* luego se ajusta para que quede con la misma referencia de altura de *Nivel1* (ver sección 5.2.2.4), esto para que ambas variables se puedan comparar y luego calcular la diferencia de nivel (*DeltaNivel*).

Teniendo los valores de *Nivel1*, *Nivel2* y *DeltaNivel* compatibles con la lógica de control, se procede a evaluarlas en para definir la acción a realizar; cada caso y acción corresponde a los valores de la tabla 5.9. La acción que debe ejecutarse se asigna a variables que definen que hacer con R1, R2 y el limpiarrejas. Sin embargo estas variables no afectan a las salidas del PLC, para esto se utiliza la subrutina *GenerarSalidas*. En la tabla 5.17 se describe lo que hace cada una de estas variables.

Tabla 5.17. Variables que definen las acciones de la rutina *Auto*.

Variable	Valor	Descripción
StemR2	1	Abrir R2
	0	Cerrar R2
CierreR1	1	Cerrar R1
	0	Detener R1
AbriendoR1	1	Abrir R1
	0	Detener R1
StempLR	1	Encender el limpiarrejas
	0	Apagar el limpiarrejas

5.2.5.6 Posición de apertura mínima de la compuerta R1.

Al tomar la decisión de detener R1 en la subrutina *Auto*, ya sea cuando se estaba abriendo o cerrando la compuerta, se verifica primero que la apertura de la compuerta sea mayor al valor definido en la variable *AperturaCompMin*; este valor corresponde a la mínima apertura que no genera un comportamiento turbulento fuerte en el agua que sale por la compuerta. La forma correcta de operar la compuerta es:

- a. Cuando R1 se está abriendo, no debe detenerse antes de superar ese porcentaje de apertura mínimo.
- b. Cuando R1 se está cerrando y está dentro del porcentaje de apertura mínimo, se debe terminar de cerrar la compuerta.

Ese tipo de decisiones al accionar R1 se implementó en el programa del PLC, sin embargo no se indica en la tabla 5.9 para facilitar su comprensión. El algoritmo utilizado se muestra en la figura 5.46 y funciona de la siguiente forma:

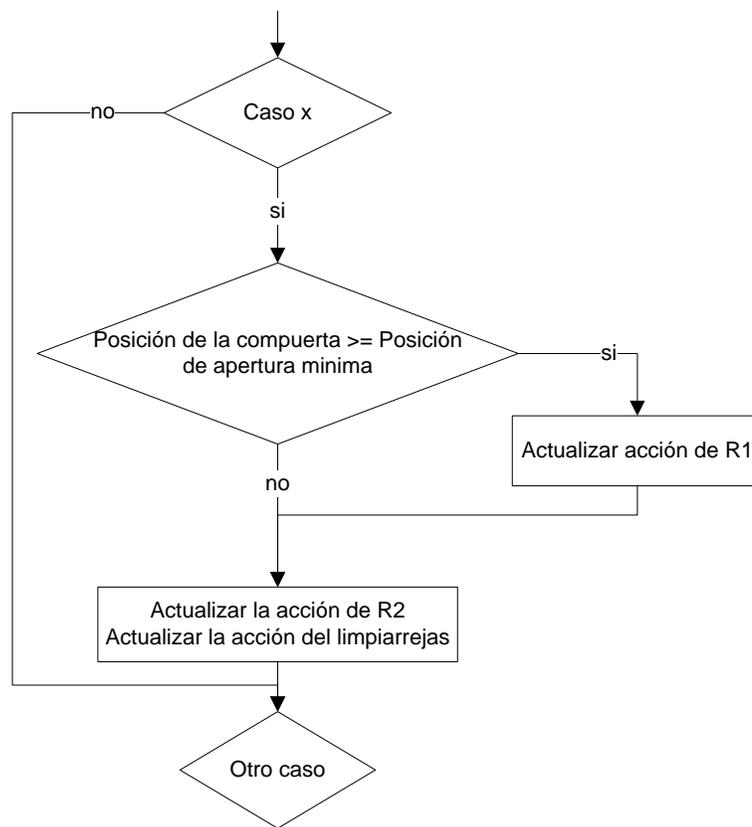


Figura 5.46. Algoritmo utilizado para actualizar las acciones a realizar cuando se va a detener R1.

La condición “Caso x” representa cualquier condición de la tabla 5.9 que deba detener R1. El algoritmo evalúa que la compuerta esté abierta más del mínimo permitido, si esto se cumple se puede detener R1, de lo contrario la acción de R1 no se actualiza, pero el resto de acciones sí.

5.2.5.7 Temporizador para le lectura de los sensores de nivel.

El cambio en el nivel de la toma de agua no se desea controlar de forma exacta ni instantánea mediante las compuerta, solamente se desea identificar un cambio en el nivel luego de varios segundos para que el sistema realice las acciones pertinentes. Los sensores de nivel realizan lecturas cada 2.4s; la subrutina *Auto* cuenta con un temporizador (*TempSensores*) para leer las entradas analógicas cada cierto tiempo y no cada ciclo de escaneo del PLC, este se fijó en 2.4 s pero puede ajustarse. La figura 5.47 muestra la instrucción del temporizador el cual habilita las instrucciones de lectura de las entradas analógicas *AIW0* y *AIW2*, además de las rutinas para acondicionar las señales.



Figura 5.47. Temporizador para leer los sensores de nivel.

5.2.5.8 Subrutina *GenerarSalidas*.

Esta subrutina actualiza las salidas del PLC según los valores que tengas las variables de la tabla 5.17, que son controladas por la subrutina *Auto*; además enciende y apaga los indicadores luminosos que informan la posición de R1 y R2. Antes de actualizar las salidas se verifica la posición de las compuertas para comprobar que sea posible abrir o cerrar una compuerta. Las salidas se programaron con la lógica de *Set* y *Reset*, es decir, su último valor se mantiene hasta que se le asigne uno nuevo. En la figura 5.48 se muestra el diagrama de flujo de esta subrutina.

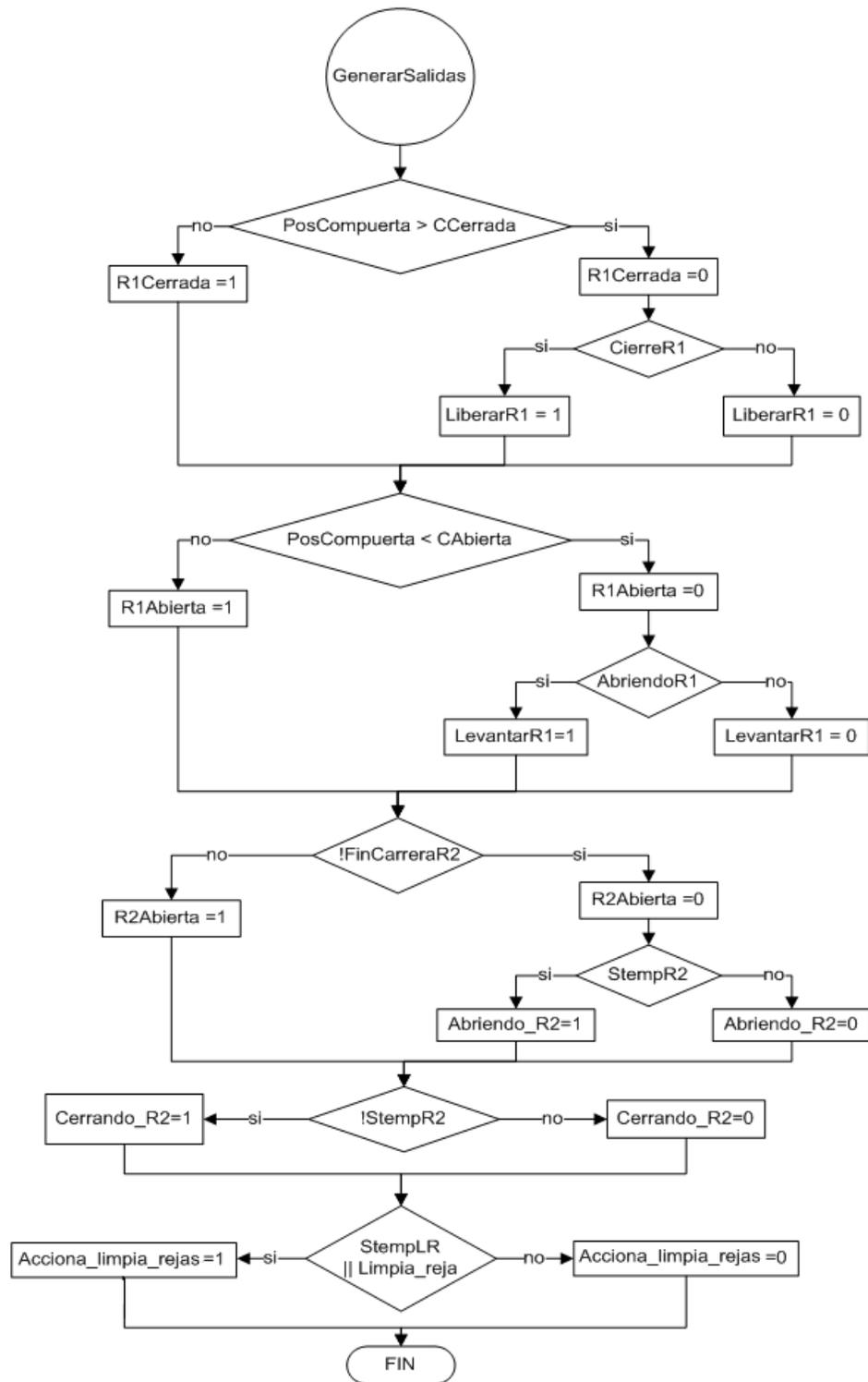


Figura 5.48. Diagrama de flujo de la rutina *GenerarSalidas*.

5.2.5.9 Subrutina *Manual*.

El diagrama de flujo para el modo manual se muestra en la figura 5.29. Básicamente revisa las entradas digitales al PLC que se encargan de controlar las compuertas y el limpiarrejas, además lee los sensores de final de carrera y la posición de R1 para evaluar la posibilidad de abrir o cerrar las compuertas.

La razón por la cual la compuerta R1 se controla con las variables *A_C_R1* y *MoverR1*, es para que no se le pueda dar la orden de abrir y cerrar la compuerta al mismo tiempo, así queda solucionado sin tener que escribir mucho código para evitar condiciones no deseadas; de igual forma se hace con R2. En la tabla 5.13 se describe cada señal de la subrutina.

5.2.5.10 Rutinas *Leer_sensor_posicion* y *leerSensorNivel*.

Estas rutinas funcionan como acondicionadores de señal para las entradas analógicas leídas por el PLC, es decir: *NiveldeSensor1*, *NiveldeSensor2* y *PComp*. El parámetro de entrada de la subrutina *Leer_sensor_posicion* es *MedPos*, y el de *leerSensorNivel* es *Entrada*. Para acondicionar la señal de forma exacta se hace multiplicación y resta con punto flotante. La rutina realiza los siguientes pasos:

- 1.Pasa el dato a 32bits.
- 2.Pasa el dato a punto flotante.
- 3.Acondiona la señal.
- 4.Redondea el resultado.
- 5.Lo convierte a 16 bits y lo utiliza como salida de la subrutina.

En las figuras 5.49 y 5.50 se muestran los diagramas de flujo de estas dos subrutinas. Los valores de *mc*, *bc*, *mn* y *bn* se deben calcular según la calibración que se haga de los sensores al definir los valores máximos y mínimos. En la sección 5.2.2.5 se muestra la forma de calcularlos.

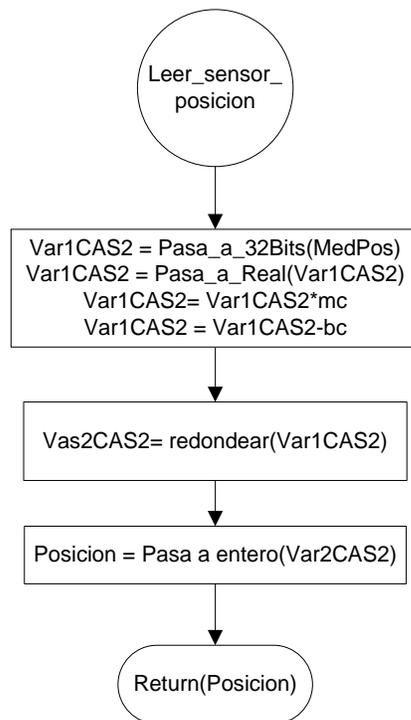


Figura 5.49. Diagrama de flujo de la subrutina *Leer_sensor_posicion*.

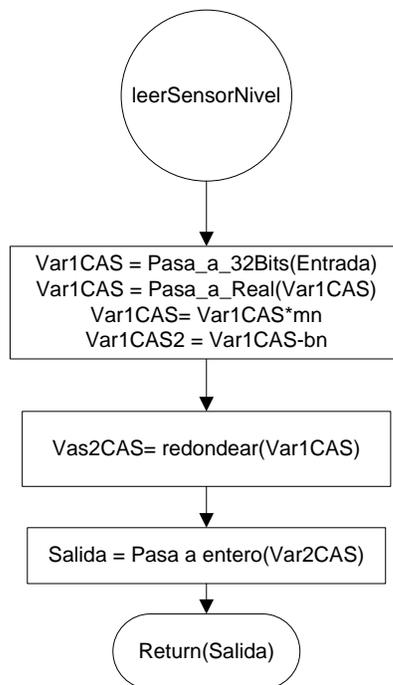


Figura 5.50. Diagrama de flujo de la subrutina *LeerSensorNivel*.

5.2.5.11 Rutina *Resetear*.

Se encarga de inicializar las variables: *StempR2*, *CierreR1*, *AbriendoR1* y *StempLR* cuando el sistema está operando en modo manual, esto para que no se mantengan almacenadas las últimas acciones realizadas en modo automático, así se evita que al regresar a modo automático las salidas tomen los últimos valores que tenían.

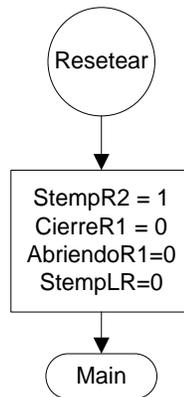


Figura 5.51. Rutina *Resetear*.

5.2.5.12 Panel de control.

El medio de comunicación entre el usuario y el PLC se realiza a través de una unidad de mando y señalización que consiste en interruptores e indicadores luminosos. Las señales a las cuales el operador tiene acceso para controlar el sistema son:

- a. *A_C_R1*
- b. *MoverR1*
- c. *A_C_R2*
- d. *MoverR2*
- e. *Limpia_reja*
- f. *Cierre_especial*
- g. *Manual_Auto*.

La función de cada una de estas señales se muestra en la tabla 5.13 excepto la de *Manual_Auto*, la cual es para seleccionar por medio de un interruptor el modo de operación entre manual (0) y automático (1).

Para estos paneles existen muchos tipos de dispositivos que se seleccionan según el diseño de la solución. El panel diseñado se compone solamente de interruptores, esto porque la función que realiza cada uno de ellos toma un tiempo considerable, es decir, para abrir o cerrar las compuertas puede tardar alrededor de 4 minutos, por lo que un botón obligaría al operario a mantenerlo presionado, mientras que un interruptor está hecho para este tipo de tareas. Cada interruptor posee un indicador luminoso para saber en qué posición se encuentra de forma más sencilla.

En las figuras 5.52 y 5.53 se muestran los diagramas eléctricos de la unidad de mando y señalización. Los interruptores seleccionados tienen el LED internamente; los indicadores luminosos deben conectarse a las salidas del PLC.

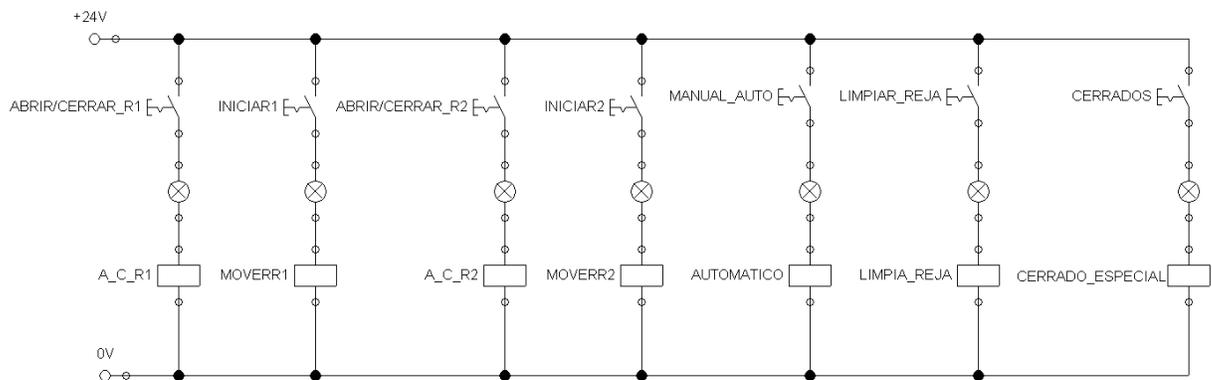


Figura 5.52. Diagrama eléctrico de los interruptores de la unidad de mando y señalización.

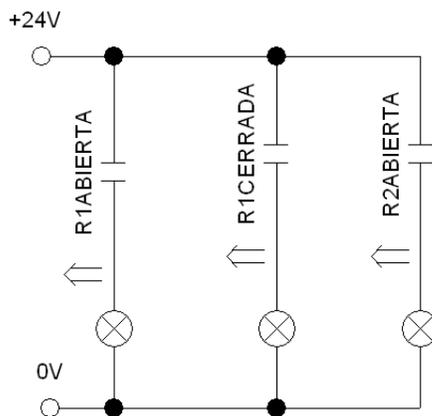


Figura 5.53. Diagrama eléctrica de los indicadores luminosos de la unidad de mando y señalización.

Las figuras 5.54 y 5.55 muestran un interruptor y un indicador luminoso. El modelo elegido de cada uno se muestra en las tablas A.3 y A.4. La conexión de estos dispositivos al PLC se puede observar en la figura A.4.



Figura 5.54. Interruptores Telemecanique con LED para controlar el sistema.



Figura 5.55. LED Telemecanique para indicar la posición de las compuertas

El encapsulador donde se ubicarán los interruptores y LED se muestran en la figura 5.56. Para los interruptores se utilizará uno de 8 espacios y para los LED uno de 3 espacios.

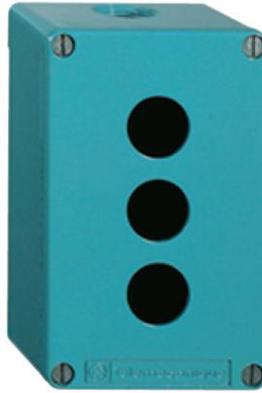


Figura 5.56. Encapsulador XAP M Telemecanique.

5.2.5.13 Fuentes de alimentación

Para alimentar las etapas en corriente directa del sistema se requieren fuentes de 24 V. La corriente máxima que deberá proveer puede determinarse a partir del consumo de los dispositivos a utilizar, esto se observa en la tabla A.5.

Se utilizarán dos fuentes Zelio de 1.2 A a 24 Vdc en paralelo, esto para poder cubrir las pérdidas generadas por los cables, interruptores e indicadores luminosos, además de la capacidad de funcionar si se añade algún dispositivo a futuro.

En la figura A.4 las fuentes corresponden a la conectada a la patilla 1M y deben ir en paralelo. La fuente que se conecta a 1L deberá seleccionarse luego de conocer el consumo de las electroválvulas (la mayoría trabajan a 24 V). La alimentación del PLC es de 120 V en corriente alterna por lo que se utiliza la red eléctrica de la toma de agua.

Capítulo 6: Análisis de resultados.

Con la intención de que el modelo de la toma de agua fuera capaz de detectar una avenida, podrían haberse definido menos términos difusos, de forma tal que los estados fueran: “hay avenida” y “no hay avenida”. Sin embargo para aprovechar aún más el potencial de un modelo difuso y el resto de características de la solución, se realizó de forma tal que las compuertas de la toma de agua van a buscar el máximo aprovechamiento de caudal del río por medio de un nivel de equilibrio; que se puede traducir como la salida en estado estable del sistema. Por eso el modelo obtenido permite no solo detectar una avenida, sino también, la intensidad de la avenida.

Para detectar una obstrucción de la reja, podría haberse simplificado por medio de la detección del nivel “mínimo” en el desarenador; ya que indicaría una obstrucción total de la reja. No se hizo de esa forma porque desaprovecharía caudal y tomaría mucho tiempo limpiar la reja, por hacerlo solo en el peor de los casos. Los términos difusos que se definieron y la lógica de control para detectar la obstrucción de la reja, permiten regular el momento en el cual se quiere que se empiece a limpiar la rejilla, ya sea con o sin avenida, permitiendo así una respuesta eficiente.

El sensor Sitrans Probe Lu tiene un error máximo de 6 mm (ver tabla 5.7), lo cual permite conocer la exactitud en la medición de los niveles, sin embargo, la variable *DeltaNivel* va a arrastrar un error máximo de 12 mm. Como el error es de aproximadamente 1cm, la respuesta del sistema no se va a ver afectada de forma considerable para valores de *DNm* mayores a 5 cm, los cuales representan una buena exactitud. Si se utilizara un valor de 10 cm, por ejemplo; el error influiría aún menos aún con una respuesta eficiente.

La lógica de control definida para el sistema en modo automático es capaz de hacer todas las acciones que realizan los operadores de la toma de agua, más aún se diseñó para mejorar la respuesta al incluir a R2 en el algoritmo. Por otro lado, la lógica para el control manual brinda la posibilidad de operar la toma tanto durante

avenidas, como para labores de mantenimiento. La eficacia del algoritmo se pudo comprobar con el simulador S7-200 al aplicarle todas las posibles combinaciones de las señales de entrada.

Como el diseño del algoritmo se puede visualizar y entender fácilmente por medio de la tabla 5.9, el sistema puede ser mejorado a futuro con mucha facilidad; esto si se llega a encontrar una lógica de control más eficiente para la toma de agua. La tabla actual podría reducirse, ya que algunas acciones se repiten para varias condiciones, sin embargo no se hizo porque disminuiría el “conocimiento” del sistema. El diseño permite realizar acciones ante cualquier combinación en las entradas del sistema, además se hicieron pruebas de modificaciones en el programa.

Como el operador tiene acceso a varios interruptores para controlar el sistema, el algoritmo se hizo para disminuir las posibles combinaciones de entradas no deseadas, por ejemplo, abrir y cerrar una compuerta al mismo tiempo. De ésta forma, el riesgo de que el operador realice acciones inesperadas para el programa se disminuyó y se comprobó el funcionamiento con los simuladores S7-200 y Festo Hydraulic.

Los sensores de final de carrera y el codificador de posición, le brindan información al sistema para que el PLC proteja la etapa hidráulica, de hecho, la compuerta R1 está protegida por medio de los dos sensores por si uno llega a fallar. Conociendo la posición instantánea de R1, se pudo diseñar el algoritmo que evita generar turbulencia cuando la compuerta no se abre lo suficiente; esto fue un requisito para controlar la toma de agua, y las simulaciones permitieron comprobarlo.

El diseño eficiente de los cilindros hidráulicos se hizo por medio de un análisis físico, principalmente para calcular la fuerza necesaria para levantar las compuertas. Al observar la figura 5.33, se puede deducir que conforme aumenta el nivel de agua (h) en la toma, es más fácil levantar la compuerta (M_R es negativo). La necesidad de utilizar cilindros hidráulicos de doble efecto, es para lograr cerrar R1 en una

emergencia, donde la cantidad de agua en la toma no permita cerrar la compuerta por peso. Se pudo determinar entonces que la fuerza máxima para levantar la compuerta se da cuando no hay agua, y considera solamente el peso y la fricción en los sellos.

Para que las compuertas se pudieran accionar aún en las peores condiciones, el diseño se hizo considerando situaciones inesperadas, por eso se fijó un factor de seguridad de 30%; éste factor se eligió a partir de una recomendación de un experto en el diseño de cilindros para compuertas. Las especificaciones finales de los cilindros están dentro del rango lógico esperado para ese tipo de compuertas.

El tiempo de apertura de la compuerta R1 pasó, de cerca de una hora, a poco más de 4min. Esto se logró gracias a las velocidades con las que se pueden accionar este tipo de cilindros hidráulicos sin causar calentamiento excesivo del fluido.

Para dar una idea de la ganancia económica se analizó la posible mejora en la producción de energía. En la sección 5.1.7.1 se puede apreciar el mal aprovechamiento del agua en una avenida. Suponiendo un sistema ideal que lograra aprovechar toda el agua que ingresa a la toma, se obtuvieron ganancias de hasta 18% durante un periodo fuera de punta (19 horas), ya que en ese momento es que se utilizaría el agua extra en el embalse. Esto se traduce en la suma monetaria que se puede observar en la tabla 5.4.

Cuantificar las ganancias económicas del proyecto en cuanto a operación, mantenimiento y seguridad requiere un análisis que se sale del alcance de este proyecto, además requiere utilizar mucha información de costos que la empresa prefiere no revelar. Sin embargo se aprecia claramente las fuentes de ganancias por parte del proyecto (sección 5.1.7). Pueden identificarse otro tipo de ventajas, por ejemplo, mejoran la calidad de los procesos de operación y brinda información para analizar el comportamiento del río a largo plazo, que luego puede usarse para pronosticar los despachos de producción.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.

7.1 Conclusiones.

- a. El modelo difuso permite identificar la intensidad de una avenida y el grado de obstrucción en la reja.
- b. Los controladores difusos permiten controlar sistemas complejos emulando a un operador experto a través de la lectura de sus entradas.
- c. Los sensores de nivel ultrasónico son una opción para centrales hidroeléctricas que no requiere mantenimiento.
- d. La lógica de control del sistema puede variarse a futuro para mejorar su respuesta.
- e. Maniobrar R1 y R2 en conjunto puede mejorar el control de avenidas.
- f. La máxima fuerza necesaria para levantar R1 y R2 se da cuando no están en contacto con el agua.
- g. Aunque los cilindros hidráulicos de R1 y R2 son de doble efecto, deben operarse como cilindros de efecto simple bajo condiciones normales.
- h. Los sensores seleccionados para R1 y R2 protegen los cilindros hidráulicos.
- i. El diseño permite operar la toma de agua aún sin alimentación eléctrica.
- j. El *software* de simulación S7-200 permitió verificar el programa desarrollado tanto en modo “manual” como “automático”.

7.2 Recomendaciones

Colocar los sensores de nivel en una especie de brazo articulado para facilitar su acceso, de forma tal que la altura del sensor no varíe.

Como la compuerta R2 no requiere estar abierta por completo, el sensor de final de carrera podría ubicarse de forma que la compuerta se abra solamente lo necesario.

La pantalla de los sensores de nivel puede utilizarse para realizar lecturas periódicas, esto para poder analizar el comportamiento de la toma durante avenidas.

Al configurar los sensores analógicos, es bueno utilizar los valores de 4 y 20 mA para mediciones fuera del rango de trabajo, de esa forma no se darán lecturas erróneas.

Capítulo 8: Bibliografía.

- [1]. Alcoy, J. S. (s.f.). Manual de usuario Simatic S7-200 CPU 224.
- [2]. Canto, C. *Entradas y salidas en un PLC*. Facultad de Ciencias.
- [3]. Departamenteo de diseño mecánico. (s.f.). Sensores de nivel.
- [4]. Duarte, O. G. *Sistemas de Lógica Difusa - Fundamentos*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- [5]. Electric, S. (2008). *The essential guide of detection*. Schneider Electric Industries SAS.
- [6]. Espinosa., J. A. *Medición de nivel y caudal por ultrasonido*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [7]. Inc, S. M. (2008). *Instruction Manual-Sitrans Probe LU*. Peterborough: Siemens.
- [8]. Jaramillo, E. V. (2006). *Diseño de una compuerta Hidráulica tipo segmento para un nivel máximo de aguas arriba de 2m y un nivel máximo de aguas abajo de 2.30m*. Guayaquil: Escuela superior politécnica del litoral.
- [9]. LDTA, D. d.-C. (2009). *Lazo de corriente de 4-20mA - Una alternativa sencilla de comunicación industrial*. Santiago de Chile: COMIND.
- [10]. Maccarrone, G., & Álvarez, E. N. *Controladores lógicos programables (PLC)*.
- [11]. Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- [12]. Muñoz, G. T. *Tutorial de lógica Fuzzy*. Lima: Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima-Peru.
- [13]. Omar Velarde Anaya, U. T. (s.f.). Automatización II, Introducción a los PLC.
- [14]. ORBINOX. (s.f.). Equipos hidromecánicos.
- [15]. Paxtian, Z. J. (s.f.). Recuperado el 5 de Abril de 2010, de Facultad de ciencia de la electrónica: <http://kim.ece.buap.mx/posgrado/Fuzzytutorial/>
- [16]. PLCS.net. (s.f.). *PLCS.net*. Recuperado el 15 de Febrero de 2011, de <http://www.plcs.net/index.shtml>
- [17]. Quiroga, J. I. (2008). Instalación de sistemas de automatización y datos.

- [18]. Saltos del pirneo, t. y. (s.f.). Limpiarrejas mecánicas e hidráulicos. Compuertas, valvulas y clapetas.
- [19]. Sapiensman.com. (s.f.). *Cilindros hidráulicos y neumáticos. Actuadores.* Recuperado el 15 de Marzo de 2011, de Sapiensman.com: http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm
- [20]. Siemens. (2008). *S7-200 Programmable controller system manual.*
- [21]. SMAR. *SMART POSITION TRANSMITTER TP301.* www.smar.com.

Apéndices y anexos

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología.

Reja: También llamada parrilla o rejilla, es un armazón metálico de barras paralelas que se coloca entre la toma de agua y un canal, la cual se encarga de evitar el paso de materiales sólidos flotantes superiores a cierto tamaño.

Limpiarrejas: También llamado limpiarrejillas o desparrillador, es un sistema automático encargado de retirar los sólidos capturados por la reja.

Nivel sobre cresta: Corresponde a la altura de la columna de agua sobre la presa que se encuentra junto a la toma de agua.

Avenida: También se conoce como *crecida* o *cabeza de agua*. Corresponde al aumento rápido del nivel del río a causa de lluvias. En la mayoría de los casos el agua arrastra materiales que se encontraban en la orilla del río como ramas, hojas y piedras, etc.

A.2 Procedimiento para controlar la toma de agua en modo manual.

Las siguientes instrucciones solamente funcionan cuando el sistema está operando en modo manual, es decir el interruptor *Manual_Auto* está abierto. La posición del interruptor se indica por medio de etiquetas que llevan junto a ellos y con un indicador luminoso que se enciende al cerrarlo.

Seleccionar el modo automático.

Verificar lo siguiente:

1. Los interruptores *IniciarR1*, *IniciarR2* y *CierreS* deben estar abiertos.
2. Colocar el interruptor *Manual_Auto* en la posición de modo automático (cerrar el interruptor).

Abrir la compuerta R1.

1. El interruptor *IniciarR1* debe estar abierto.
2. Colocar el interruptor *Abrir/Cerrar_R1* en la posición de abrir R1 (cerrar el interruptor).
3. Cerrar el interruptor *IniciarR1*.
4. Para detener la compuerta abra nuevamente el interruptor *IniciarR1*.
5. Luego de que la compuerta se abra por completo, se recomienda abrir el interruptor *IniciarR1*.

Cerrar R1 por peso:

1. Abrir el interruptor *CierreS*.
2. Colocar el interruptor *Abrir/Cerrar_R1* en la posición de cerrar R1 (abrir el interruptor).
3. Cerrar el interruptor *IniciarR1*.
4. Para detener la compuerta abra nuevamente el interruptor *IniciarR1*.
6. Luego de que la compuerta se cierre por completo, se recomienda abrir el interruptor *IniciarR1*.

Nota: Cuando la compuerta está en movimiento no se debe mover el interruptor *Abrir/Cerrar_R1*, ya que esto ocasiona que pase de estar abriendo a cerrando o viceversa, según corresponda sin detener la compuerta.

Abrir R2 o cerrar R2 por peso:

Ver el procedimiento para Abrir R1 o Cerrar R1 mencionado anteriormente; y realice lo mismo pero con los interruptores para R2 (*Abrir/Cerrar_R2* e *IniciarR2*).

Cierre de las compuertas por presión.

1. Verificar que los interruptores *IniciarR1* e *IniciarR2* estén abiertos.

2. Cerrar el interruptor *CierreS*.
3. Abrir el interruptor *Abrir/Cerrar_R1* y/o *Abrir/Cerrar_R2* según se desea. Ambos deben abrirse para cerrar las compuertas simultáneamente.
4. Cerrar el interruptor *IniciarR1* y/o *IniciarR2*.

Para detener cualquiera de las compuertas en la posición deseada se debe abrir el interruptor *IniciarR1* o *IniciarR2*, también se pueden abrir ambos al mismo tiempo para que se detengan simultáneamente. Al terminar la operación, abra el interruptor *CierreS*.

Encender y apagar el limpiarreas.

Este procedimiento funciona tanto en modo manual como en modo automático.

1. Cerrar el interruptor *Limpiar_Reja* para encenderlo.
2. Cuando termine de limpiar la reja abra el interruptor.

A.3 Descripción de las entradas y salidas del PLC.

Entradas analógicas:

- a. *SensorToma (AIW0)*, *SensorDesarenador (AIW2)*: En estas entradas se conecta el sensor de nivel antes de la reja (toma) y luego de la reja (desarenador). En el PLC tienen un valor entre 6400 y 32000 dependiendo de la lectura del sensor.
- b. *SenCompuerta (AIW4)*: Se obtiene a partir del sensor de posición angular TP301 para la compuerta R1. De igual forma que *AIW0* y *AIW2* es un valor entero entre 6400 y 32000.

Entradas digitales

- a. *A_C_R1 (I0.0)*, *A_C_R2 (I0.2)*: Son dos señales que se controlan por el operador para indicar si desea realizar la acción de abrir o cerrar las compuertas, estas funcionan en conjunto con las señales *MoverR1* y *MoverR2*.
- b. *Mover R1 (I0.1)*, *Mover R2 (I0.3)*: Señales controladas por el operador para que se muevan las compuertas, ya sea para abrir o cerrar. La acción a realizar se define en conjunto con *A_C_R1* y *A_C_R2*.
- c. *Manual/Auto (I0.6)*: Señal controlada por el operador, esta le indica al PLC el modo de operación, es decir, manual o automático.
- d. *Limpia_reja (I0.5)*: Señal controlada por el operador, se utiliza para encender o apagar el limpiarreas.
- e. *Cierre_especial (I0.7)*: Señal controlada por el operador, se utiliza para habilitar el cierre de las compuertas por presión.
- f. *FinCarreraR1 (I1.0)*, *FinCarreraR2 (I0.4)*: Indican al controlador cuando la compuerta R1 o R2 se abre por completo, estas se obtienen a partir de la salida de los sensores de proximidad inductivos o de final de carrera.

Salidas digitales por relé:

- a. *LevantarR1 (Q0.0)*, *LevantarR2 (Q0.2)*: Señales que activan las electroválvulas que contraen los cilindros de R1 y R2.
- b. *LiberaR1 (Q0.1)*, *LiberaR2 (Q0.3)*: Señales que activan las electroválvulas para cerrar las compuertas R1 y R2 por su propio peso.
- c. *Acciona_limpia_rejas (Q0.4)*: Señal para encender y apagar el limpiarreas.
- d. *Cerrar (Q0.5)*: Señal para activar las electroválvulas que cierran las compuertas por presión. Esta señal funciona en conjunto con *LiberaR1* y/o *LiberaR2*.
- e. *R1Cerrada (Q0.6)*: Señal para encender un LED cuando la compuerta R1 está cerrada.

- f. *R1Abierta* (Q0.7): Señal para encender un LED cuando la compuerta R1 está abierta.
- g. *R2Abierta* (Q1.0): Señal para encender un LED cuando la compuerta R2 está abierta.

A.4 Constantes utilizadas en el programa del PLC.

Todas las constantes del programa se pueden modificar en la rutina *InicializarConst*. La tabla A.1 muestra la descripción de las constantes.

Tabla A.1. Constantes que se encuentran en la rutina *InicializarConst*.

Constante	Descripción	Valor
<i>NO</i>	Frontera entre los niveles Muy Bajo-Bajo en la toma, y Bajo-Medio en el desarenador ¹ .	3500
<i>NT1</i>	Frontera entre los niveles Bajo-Medio en la toma ¹	3340
<i>NT2</i>	Frontera entre los niveles Medio-Alto en la toma ¹	3140
<i>NT3</i>	Frontera entre los niveles Alto-Muy Alto en la toma ¹ .	2260
<i>ND1</i>	Frontera entre los niveles Medio-Alto en el desarenador ¹ .	3370
<i>DNm</i>	Diferencial de nivel mínimo en mm aceptable entre la toma y el desarenador.	50
<i>DifAltura</i>	Diferencia de altura entre los sensores de nivel ² .	2000
<i>AperturaCompMin</i>	Valor medido por el codificador de posición para la apertura mínima de R1 sin generar turbulencia.	200
<i>CCerrada</i>	Valor medido por el codificador de posición cuando R1 está cerrada.	0
<i>CAbierta</i>	Valor medido por el codificador de posición cuando R1 está abierta.	1000
<i>mn</i>	Factor de escala del acondicionador de señal para el sensor de nivel.	0.21679
<i>bn</i>	Desplazamiento u <i>offset</i> del acondicionador de señal para el sensor de nivel (siempre se toma como positivo).	1037.28
<i>mc</i>	Factor de escala del acondicionador de señal para el codificador de posición de R1.	0.0390625
<i>bc</i>	Desplazamiento u <i>offset</i> del acondicionador de señal para el codificador de posición.	250
<i>DP</i>	Diferencia de altura en mm entre el sensor de nivel y la pared de la toma de agua (ver figura 5.15).	250

¹ El valor de la constante corresponde a la diferencia de altura en milímetros desde el punto más alto de la entrada de la toma, hasta el punto determinado para ese nivel.

² Esta distancia es en mm y se puede observar en la Figura 5.19.

A las constantes *NO*, *NT1*, *NT2*, *NT3* y *ND1* se les resta *DP*, esto porque son distancias medidas desde el punto más alto de la entrada de la toma de agua, pero como el sensor se coloca un poco más abajo, debe hacerse esta corrección para que las distancias reales sean compatibles con la medición del sensor.

A.5 Modificar el valor de alguna constante en la rutina *InicializarConst*.

Para asignar un nuevo valor a cualquiera de las constantes, primero debe estar seguro de comprender el efecto que causará en el funcionamiento de todo el sistema, luego debe abrir el archivo del proyecto *TA_CH_Platanar.mwp*, y en la rutina *InicializarConst* se encontrarán las instrucciones *MOV* que asignan el valor a cada constante. En la figura A.1 se muestra un ejemplo en el cual se le asigna el valor de 3500 (entrada *IN*) a la constante *NO* (salida *OUT*), de igual forma se hace con el resto de constantes; solamente se debe introducir el valor deseado en la entrada *IN* para la constante correspondiente que se observa en la salida *OUT* de la instrucción a modificar.

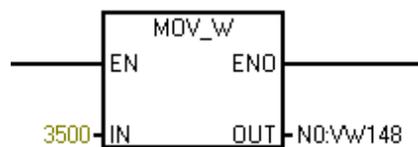


Figura A.1. Ejemplo de instrucción que asigna el valor a una constante.

A.6 Habilitar el filtrado en las entradas del módulo EM 231.

En el manual del PLC SIMATIC S7-200 se muestran todas las características que posee el módulo EM 231, además de todos los pasos para su correcta conexión, configuración, etc. Para habilitar el filtrado de sus entradas se debe hacer lo siguiente en el programa STEP 7-MicroWIN:

1. Seleccione Ver > Componente > Bloque de sistema y luego Filtrar entradas en el cuadro de la izquierda.

2. Seleccione las entradas analógicas a filtrar, en este caso *AIW0*, *AIW2* y *AIW4*.
3. Seleccione 64 en el número de muestreos y 320 en la banda muerta.
4. Presione aceptar.

La banda muerta es para restablecer el valor real analógica si el promedio calculado excede en más de la banda muerta al valor real medido.

A.7 Conexión de las salidas al PLC.

Las salidas digitales del PLC son por relé, esto permite controlar tanto dispositivos de corriente directa (5V- 30V) como de corriente alterna (5V-250V). En la figura A.2 se muestra un diagrama de la conexión de dispositivos a las salidas del PLC.

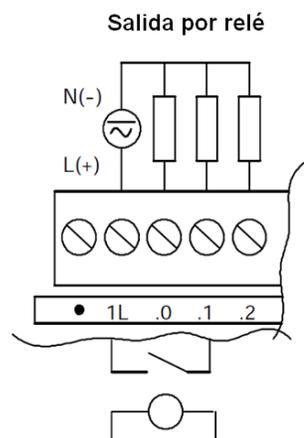


Figura A.2. Conexión de las salidas por relé del PLC [20].

A.8 Conexión de un sensor digital al PLC

Dependiendo del tipo de sensor que se utilice la conexión va a variar. Los sensores de fin de carrera son de tipo PNP activados por corriente, estos se conectan de forma tal que cuando el sensor está activo le suministra corriente al PLC. En la figura A.3 se muestra el diagrama de conexión de este sensor.

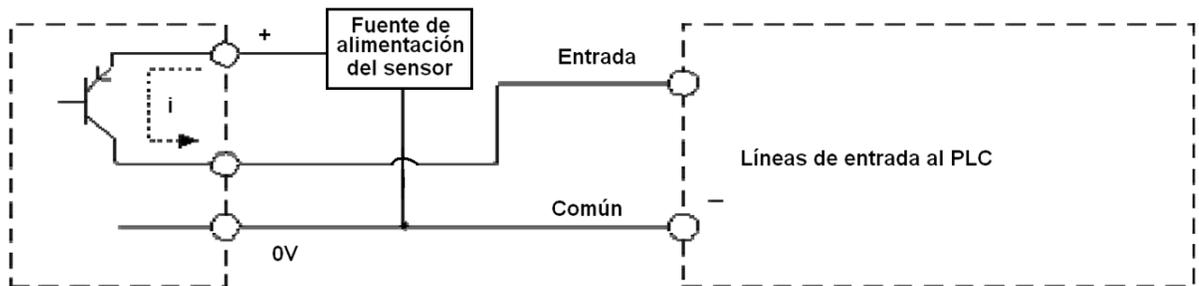


Figura A.3. Conexión de un sensor PNP con salida de corriente a un PLC [2].

A.9 Conexión de entradas y salidas al PLC

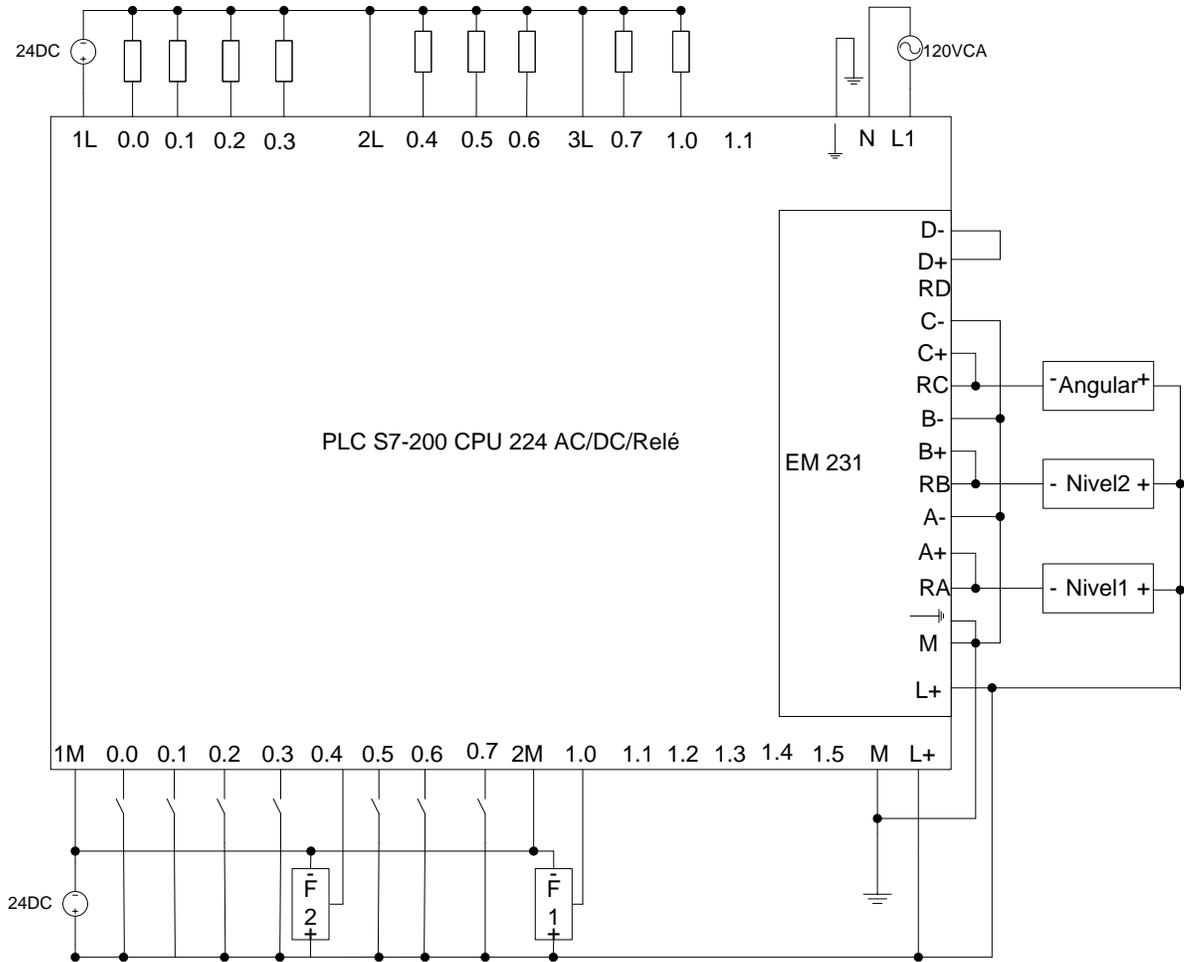


Figura A.4. Diagrama eléctrico de las conexiones de las entradas y salidas al PLC.

A.10 Variables utilizadas en el programa del PLC.

En la tabla A.2 se muestra la dirección de memoria para cada variable que se utilizó en el programa del PLC (*TA_CH_Platanar.mwp*).

Tabla A.2. Dirección de memoria de las variables utilizadas en el programa.

DP	VW186	R1Abierta	Q0.7
ND1	VW168	R1Cerrada	Q0.6
CAbierta	VW166	Cerrar	Q0.5
CCerrada	VW164	Acciona_limpia_rejas	Q0.4
AperturaCompMin	VW162	LiberaR2	Q0.3
DifAltura	VW160	LevantarR2	Q0.2
DNm	VW156	LiberaR1	Q0.1
NT3	VW154	LevantaR1	Q0.0
NT2	VW152	CierreS2	M28.2
NT1	VW150	CierreS1	M28.1
N0	VW148	Encendido	M27.0
NiveldeSensor2	VW136	StempLR	M26.7
NiveldeSensor1	VW122	StempR2	M26.6
PosCompuerta	VW118	AbrirR1Todo	M26.5
DeltaNivel	VW116	AbriendoR1	M26.4
Nivel2	VW114	CierreR1	M26.3
Nivel1	VW112	FinCarreraR1	I1.0
PComp	VW108	Cierre_especial	I0.7
bc	VD182	Manual_Auto	I0.6
mc	VD178	Limpia_reja	I0.5
bn	VD174	FinCarreraR2	I0.4
mn	VD170	MoverR2	I0.3
Var2CAS2	VD144	A_C_R2	I0.2
VAR2CAS	VD140	MoverR1	I0.1
Var1CAS2	VD132	A_C_R1	I0.0
Var1CAS	VD124	SenCompuerta	AIW4
TempSensores	T37	SensorDesarenador	AIW2
R2Abierta	Q1.0	SensorToma	AIW0

A.11 Unidad de mando y señalización.

Cada interruptor y LED tienen diferente número de serie según su color. En las tablas A.3 y A.4 se muestran esta información.

Tabla A.3. Color y serie de cada interruptor del panel.

Interruptor	Color		Serie
Abrir/cerrarR1	Verde		ZB5 AK1233
Iniciar1	Blanco		ZB5 AK1213
Abrir/cerrarR2	Verde		ZB5 AK1233
Iniciar2	Blanco		ZB5 AK1213
Manual/Auto	Rojo		ZB5 AK124
Limpiar Reja	Azul		ZB5 AK1263
CierreS	Rojo		ZB5 AK1243

Tabla A.4. Color y serie de cada LED.

Señal	Color		Serie
R1Abierta	Blanco		ZB5 AVB1 + ZB5 AV013
R2Abierta	Rojo		ZB5 AVB4 + ZB5 AV043
R1Cerrada	Verde		ZB5 AVB3 + ZB5 AV033

A.12 Fuente de CD del PLC.

La tabla A.5 muestra el consumo de corriente directa que requiere el PLC para funcionar correctamente. No se incluye el consumo de las electroválvulas; para la alimentación eléctrica de ellas debe hacerse el cálculo luego de seleccionarlas.

Tabla A.5. Consumo de corriente de los principales dispositivos alimentados por la fuente de 24 V.

Dispositivo	Consumo de corriente máximo [mA]
PLC	280
EM 231	60
Sensores de nivel	2 x 380
Sensor de posición	21
Total	1121

A.13 Contactos para adquirir la mayoría de componentes necesarios para el proyecto.

Para los principales dispositivos que se requieren para la implementación del proyecto se seleccionaron diferentes empresas. En la tabla A.6 se muestra un resumen con los contactos.

Tabla A.6. Contactos para adquirir la mayoría de dispositivos del diseño.

Componente	Contacto	Teléfono	Correo Electrónico
PLC, sensores de final de carrera, sensores de nivel, fuentes de poder, interruptores y LED.	Allan Muñoz Porras (<i>Electrobeyco</i>)	24600775 Ext 38	allan@electrobeyco.com
Sensor angular	Ing. Jose J Herra Lippi (<i>Control y Automatización S.A</i>)	25921714 Ext 602	jherra@control.co.cr
Cilindros hidráulicos	Alfonso Ayub		aycarco@yahoo.com
Grupo hidráulico	Alonso Porras Cabezas (<i>Componentes Hidráulicos y Servicios S.A.</i>)	22214740 Ext 120	aporras@componenteshidraulicos.com