

# UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA, INFORMATICA Y MECANICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**TESIS:**

**SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE NIVEL DE AGUA EN LA CÁMARA DE  
CARGA BASADO EN LA LÓGICA DIFUSA PARA LA CENTRAL  
HIDROELÉCTRICA DE MACHUPICCHU**

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO PRESENTADO POR:  
**Br. EMILIO ENRIQUE MEZA TTITO**

ASESOR:  
**Ing. ROGER JESUS COAQUIRA CASTILLO**

**CUSCO, DICIEMBRE DEL 2019**

## **PRESENTACIÓN**

Señores Miembros del Jurado Dictaminador; De acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Informática y Mecánica de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, presento la tesis denominada "Sistema de Control Automático de Nivel de Agua en la Cámara de Carga Basado en la Lógica Difusa para la Central Hidroeléctrica de Machupicchu ", para su evaluación, con la finalidad de obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico.

El presente trabajo se ha desarrollado aplicando los conocimientos adquiridos en la universidad, así como la investigaciones realizadas en el ámbito de generación de energía eléctrica, las pruebas del diseño se ha realizado en las instalaciones de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, cuyo resultado se redacta en lo posterior, sin embargo, es posible que en la presente tesis puedan encontrarse algunos errores involuntarios, producto de la poca experiencia en investigación, razón por lo que espero su comprensión al momento de emitir su veredicto final.

Emilio Meza.

Bachiller en Ing. Electrónica

## **DEDICATORIA**

Les dedico este logro a mis padres, quienes dejaron este mundo para transformarse en el símbolo de motivación de mí y de mis hermanos, quienes a pesar del paso del tiempo sigue siendo el ejemplo para seguir, ellos fueron la base de mi formación como persona y que siempre confiaron en mí.

A mis hermanos por el apoyo que siempre me brindaron en el transcurso de cada año de mi vida para lograr mis metas y objetivos.

Emilio Meza.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por la vida y salud, por mis padres, mi familia, por concederme la oportunidad de poder seguir cumpliendo mis metas y objetivos.

Agradezco de manera especial a José Ramón Solchaga quién fue más que un amigo para mí, por su constante e incondicional apoyo motivacional, y porque sentó en mí la base de la responsabilidad y deseos de superación; en él tengo el espejo en el cual me quiero reflejar por sus virtudes y su gran corazón.

Agradezco al gerente de producción y a la jefatura de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, por su confianza, por haberme dado la oportunidad para desarrollar mis capacidades y de poder poner en práctica mis conocimientos teóricos de mi formación profesional en el sector de generación de energía eléctrica.

Agradezco al asesor y docentes de la universidad, por su labor de orientación en el proceso de la elaboración de este proyecto de aplicación tecnológica para la obtención de mi título profesional.

Emilio Meza.

## INTRODUCCIÓN

La fuente principal de energía renovable en el Perú es la energía del agua de los ríos; a pesar de que se tiene un potencial hidroeléctrico, su desarrollo requiere superar algunas barreras relativas al medio ambiente, la aceptación pública, y los aspectos económicos.

En el mundo de la generación hidroeléctrica, predominantemente se tiene centrales de tipo embalse y de pasada de río. Las centrales de embalse necesitan construcciones de represas grandes para acumular el agua de los ríos, para luego caer desde la altura adecuada sobre una turbina hidráulica, haciéndola girar y produciendo electricidad con los generadores eléctricos acoplados al eje de la turbina. Las centrales de pasada de río o desviación del curso del río, como la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, aprovechan el desnivel natural del río para luego derivar el agua por un canal hasta la central en donde se mueven las turbinas; generando energía eléctrica de manera similar a las centrales de embalse. En la mayoría de este tipo de centrales se usan turbinas de tipo Pelton, debido a que los ríos generalmente poseen caudales variables; sin embargo, dependiendo de la geografía, se puede conseguir saltos elevados. Este tipo de centrales operan de forma continua ya que no tienen capacidad para almacenar el agua.

Las principales características de las represas son las curvas de cota-volumen y los niveles de agua característicos de operación normal. Es decir, tiene un salto variable entre un mínimo y un máximo; por ejemplo, la central hidroeléctrica más grande de Brasil, Itaipú, tiene un salto bruto mínimo de 84 m y un salto máximo de 128 m. La potencia de una central de embalse es directamente proporcional al nivel y al flujo de agua. De manera similar, en las centrales de pasada de río, la regulación de generación es en base al caudal del río; cuya capacidad depende de los factores climatológicos y otros que regularmente bajan su generación al mínimo en épocas de estiaje. En épocas de avenida el flujo de agua que ingresa a la planta es controlado en la represa, el flujo excedente se deja circular por el cauce natural del río y el control de flujo de agua más fino, en la mayoría de las plantas, es en la cámara de carga.

El manejo de recursos hídricos, son reglamentados por organismos del estado, ellos exigen que no se altere la flora y fauna en los cauces de los ríos y exigen que las centrales dejen circular el caudal mínimo necesario, especialmente, en épocas de estiaje; además, monitorean el grado de contaminación y la calidad de aguas turbinadas. En el Perú, está regulado por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental-OEFA.

La regulación de la generación en base a la capacidad hídrica de los ríos y represas no solo es para cumplir con las leyes medio ambientales, sino, por la protección de las plantas hidroeléctricas, y para evitar catástrofes lamentables como ocurrió en Rusia, con la central Sayano-Shushenskaya, en el año 2009. Fueron varias las hipótesis planteadas sobre el accidente, la más convincente es la siguiente: el día del accidente las turbinas funcionaban a un nivel de trabajo de 212 m. La turbina dos trabajó como reguladora de la salida de energía de la planta, debido a eso su potencia de salida cambio constantemente. Las turbinas Francis tienen una banda de trabajo muy estrecha en régimen de alta eficiencia. Si esta banda se excede las turbinas presentan vibración, causada por la pulsación de flujo y los golpes de agua. Después del accidente, concluyeron que las altas vibraciones registradas fueron la causa más probable para que la tapa superior de la turbina se desprendiera y la fuerza de empuje del agua levantara las 920 toneladas del rotor. Las vibraciones de los rodamientos alcanzaron 0.84 mm, valor que superó en más de 4 veces al de las otras turbinas. La vida útil esperada por el fabricante era de 30 años, en el momento del accidente, la edad de la turbina dos era de 29 años y 10 meses.

## RESUMEN

En este proyecto se presenta un diseño y prueba de un sistema de control de nivel de agua en la cámara de carga basado en lógica difusa desarrollado en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. Se diseñó un sistema de control difuso con dos entradas (error y pendiente de nivel de agua) y una salida (variación de carga de la turbina Pelton) utilizando el método general que planteó Ebrahim H. Mamdani para automatizar sistemas no lineales; la data fundamental para el diseño fue el registro de datos de nivel de agua para la determinación de las funciones de pertenencia de entradas y salida del controlador difuso y el conocimiento de operación de experto en la regulación de nivel de agua en la cámara de carga.

El controlador difuso implementado en la plataforma de desarrollo LabVIEW, en un computador de escritorio; obtiene el dato de entrada, medición de nivel de agua de la cámara de carga, por medio de conexión cliente OPC del sistema SCADA de la planta. El algoritmo de control basado en lógica difusa de tipo PD (proporcional-derivativo), implementado usando la herramienta “*Fuzzy Logic Control*”, determina la variación de carga de la turbina; posteriormente este valor es enviado al PLC principal de uno de los generadores Pelton, a través de otro servidor OPC sobre la red Ethernet. El sistema de control de velocidad y carga de la turbina Pelton obtiene el valor de consignas de carga del PLC principal para controlar la apertura de los inyectores con la finalidad de mantener constante el nivel de agua en la cámara de carga dentro del rango establecido en el manual de operación (−0.50 m al −0.90 m). El algoritmo de control implementado en este proyecto busca mantener el nivel de agua constantemente por debajo del rebose, esto garantiza que toda el agua proveniente del túnel de aducción sea turbinada. Es decir, el algoritmo de control basado en lógica difusa evita que se pierda el flujo de agua por rebose, optimizando los recursos hídricos del río Vilcanota para la generación de energía eléctrica. En la implementación del sistema diseñado, fue necesario modificar el rango de nivel normal para el funcionamiento óptimo del sistema automatizado en el rango de −0.40 m a −0.80 m y con el punto de referencia en −0.60 m. En las

pruebas finales, con la sintonización apropiada con 27 reglas de inferencia difusa y con los siguientes parámetros del controlador difuso:  $K_p=1$ ,  $K_d=100$ ,  $K_u=1$ , se logró mantener el nivel de agua en la cámara de carga dentro del margen requerido con un error  $\pm 0.20$  m con respecto a la referencia del nivel de agua.

**Palabras claves:** nivel de agua, cámara de carga, lógica difusa, control difuso, potencia eléctrica.



## ABSTRACT

This project presents a design and test of a water level control system in the head pond based on fuzzy logic developed at the Machupicchu Hydroelectric Power Plant.

A diffuse control system was designed with two inputs (error and water level slope) and one output (modification of the Pelton turbine load) using the general method proposed by Ebrahim H. Mamdani to automate non-linear systems; The fundamental information for the design was the registration of water level data for the determination of the functions of membership of inputs and outputs of the diffuse controller and the knowledge of operation of an expert in the regulation of the water level in the head pond.

The fuzzy controller implemented in the LabVIEW development platform, on a desktop computer; it obtains the input data, measuring the water level of the head pond, by means of an OPC client connection of the plant's SCADA system. The control algorithm based on fuzzy logic of type PD (proportional-derivative), implemented using the “Fuzzy Logic Control” tool, determines the turbine load variation; This value is then sent to the main PLC of one of the Pelton generators, through another OPC server over the Ethernet network. The Pelton turbine speed and load control system obtains the setpoint load value from the main PLC to control the opening of the injectors in order to keep the water level in the head pond constant within the range established in the operation manual (–0.50 m to –0.90 m). The control algorithm implemented in this project seeks to keep the water level constantly below the overflow, this guarantees that all the water coming from the adduction tunnel is turbinated. That is, the control algorithm based on fuzzy logic prevents water flow from being lost due to overflow, optimizing the water resources of the Vilcanota river for the generation of electrical energy. In the implementation of the designed system, it was necessary to modify the normal level range for optimal operation of the automated system in the range of –0.40 m to –0.80 m and with the reference point in –0.60 m. In the final tests, with the

appropriate tuning with 27 fuzzy inference rules and with the following diffuse controller parameters:  $K_p = 1$ ,  $K_d = 100$ ,  $K_u = 1$ , it was possible to maintain the water level in the head pond within the margin required with an error  $\pm 0.20$  m with respect to the water level reference.

**Keywords:** water level, forebay, fuzzy logic, fuzzy control, electric power.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1. EL PROBLEMA .....	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema .....	4
1.1.3. Antecedentes .....	5
1.2. OBJETIVOS .....	7
1.2.1. Objetivo general .....	7
1.2.2. Objetivos específicos .....	7
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	8
1.4. LIMITACIÓN .....	9
1.5. ALCANCE .....	9
1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES .....	9
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
2.1. CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE AGUA FLUYENTE .....	10
2.1.1. Partes de una central hidroeléctrica.....	10
2.1.2. Sistema de control de velocidad y carga de la turbina .....	13
2.1.3. Potencia eléctrica de una central hidroeléctrica .....	16
2.2. TEORÍA DE LA LÓGICA DIFUSA Y SU APLICACIÓN.....	17
2.2.1. Antecedentes de lógica difusa .....	17
2.2.2. Lógica difusa .....	18
2.2.3. Conjuntos difusos.....	19
2.2.4. Aspectos matemáticos de la lógica difusa .....	21
2.2.5. Funciones de pertenencia elementales .....	22
2.2.6. Control difuso.....	26
2.2.7. Estructura de control difuso .....	27
2.2.8. Proceso de fuzzificación.....	27
2.2.9. Base de conocimientos .....	28
2.2.10. Inferencia difusa.....	29
2.2.11. Proceso de defuzzificación.....	30
2.2.12. Control tipo Mamdani .....	31
2.2.13. Controlador difuso clásico .....	32
2.3. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA SCADA.....	34
2.3.1. Arquitectura del sistema SCADA .....	36
2.3.2. Hardware SCADA .....	36
2.3.3. Software SCADA.....	37

2.3.4. Red de comunicación industrial .....	38
2.3.5. Comunicación OPC.....	38
2.3.6. Interfaz hombre - maquina .....	39
<b>CAPÍTULO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN .....</b>	<b>41</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	41
3.2. SELECCIÓN DEL GRUPO GENERADOR PARA LA REGULACIÓN DE NIVEL DE AGUA EN LA CÁMARA DE CARGA II .....	42
3.3. SELECCIÓN DE SOFTWARE .....	44
3.4. SELECCIÓN DE HARDWARE.....	45
3.5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DINÁMICO DE LA PLANTA.....	46
3.5.1. Cámara de carga .....	46
3.5.2. Tubería forzada .....	48
3.5.3. Turbina .....	49
3.5.4. Potencia eléctrica del generador.....	50
3.5.5. Diagrama de bloques del modelo de la planta.....	50
3.6. MEDICIÓN DE NIVEL DE AGUA EN LA CÁMARA DE CARGA II.....	51
3.6.1. Escala de medición de nivel de agua en la cámara de carga II.....	53
3.7. DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL DE NIVEL DE AGUA EN LA CÁMARA DE CARGA II ....	55
3.7.1. Algoritmo de control de nivel de agua automático .....	58
3.8. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO .....	61
3.8.1. Registro de datos de nivel de agua de la cámara de carga II.....	63
3.8.2. Acondicionamiento de la medición de nivel de agua.....	63
3.8.3. Evaluación y definición de funciones de pertenencia del error.....	65
3.8.4. Evaluación y definición de funciones de pertenencia de la pendiente .....	67
3.8.5. Evaluación y definición de funciones de pertenencia de la salida .....	69
3.8.6. Construcción de la matriz de asociación y declaración de reglas de inferencia difusa.....	71
3.8.7. Método de defuzzificación de salida.....	74
3.9. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....	76
3.9.1. Configuraciones básicas de la PC .....	77
3.9.2. Configuración de una conexión cliente OPC .....	78
3.9.3. Desarrollo del programa principal del controlador difuso .....	83
3.10. IMPLEMENTACIÓN DEL INTERFAZ DE USUARIO .....	86
<b>CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>90</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	90
4.2. PRUEBA DEL CONTROLADOR DIFUSO PROPORCIONAL CON POTENCIA .....	90
4.3. PRUEBA DE CONTROLADOR DIFUSO PROPORCIONAL-DERIVATIVO CON POTENCIA.....	92

4.4. PRUEBA DEL CONTROLADOR DIFUSO PROPORCIONAL-DERIVATIVO CON APERTURA .....	95
4.5. PRUEBAS FINALES DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....	96
4.6. ANÁLISIS FINAL DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....	98
4.7. PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO .....	101
<b>CAPÍTULO V: COSTOS Y PRESUPUESTOS.....</b>	<b>105</b>
5.1. COSTO DE EQUIPOS Y MATERIALES .....	105
5.2. COSTO DE MANO DE OBRA .....	105
5.3. PRESUPUESTO .....	107
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO F.....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO G.....</b>	<b>160</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema del circuito hidráulico de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.....	2
Figura 1-2. Central hidroeléctrica típica de desviación del curso del río. ....	5
Figura 2-1. Partes de una central hidroeléctrica de pasada de río. ....	11
Figura 2-2. Partes del alternador, a) Estator o inducido, b) Rotor o inductor .....	13
Figura 2-3. Diagrama esquemático del generador-regulador-turbina. ....	14
Figura 2-4. Modelo general de un regulador electrónico. ....	16
Figura 2-5. Funciones de lógica booleana y difusa .....	19
Figura 2-6. Conjunto booleano y difuso.....	20
Figura 2-7. Funciones L, $\Lambda$ y $\Gamma$ . ....	21
Figura 2-8. Tipos de funciones de membresía: a) Función- $\Gamma$ , b) Función-S, c) Función-L, d) Función- $\Lambda$ , e) Función Gaussiana, f) Función- $\pi$ .....	24
Figura 2-9. Sistema de control difuso realimentado.....	27
Figura 2-10. Generación de valores difusos. ....	28
Figura 2-11. Particiones difusas con distinto número de términos: a) tres términos N, Z y P;.....	28
Figura 2-12. Proceso de evaluación de reglas. ....	30
Figura 2-13. Generación de valores reales de salida. ....	30
Figura 2-14. Lazo de un controlador difuso clásico. ....	32
Figura 2-15. Respuesta de un sistema a una entrada escalón r.....	33
Figura 2-16. Funciones de pertenencia de entrada y salida.....	33
Figura 2-17. Pirámide del sistema SCADA .....	35
Figura 2-18. Arquitectura básica de hardware del sistema SCADA .....	36
Figura 2-19. Arquitectura básica de software del sistema SCADA .....	37
Figura 2-20. Ejemplos de arquitectura de OPC.....	39
Figura 3-1. Esquema del sistema de control automático planteado .....	42
Figura 3-2. Esquema del circuito hidráulico de la planta. ....	47
Figura 3-3. Diagrama de bloques del modelo de la planta simplificado. ....	51
Figura 3-4. Sistema de medición de nivel de agua.....	52
Figura 3-5. Escalamiento de señal de 4-20mA.....	52
Figura 3-6. Esquema de ubicación del transmisor de nivel en la cámara de carga II.....	53
Figura 3-7. Escala de medición del nivel de agua en la cámara de carga II.....	54
Figura 3-8. Tendencia de nivel y apertura durante la regulación manual de nivel de agua. ....	55
Figura 3-9. Algoritmo de control manual de nivel de agua en la cámara de carga II.....	57
Figura 3-10. Gráfica de relación de nivel de agua vs variación de apertura. ....	58
Figura 3-11. Algoritmo de funcionamiento del sistema de control automatizada.....	60
Figura 3-12. Diagrama de bloques del sistema de control difuso. ....	62

Figura 3-13. Interfaz de Fuzzy System Designer .....	62
Figura 3-14. Tendencia suavizada obtenida con la técnica de promedio móvil.....	64
Figura 3-15. Representación gráfica de las funciones de pertenencia del error.....	67
Figura 3-16. Tendencia de valores de la pendiente para una muestra de datos de nivel.....	68
Figura 3-17. Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la pendiente de error.....	69
Figura 3-18. Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la salida.....	71
Figura 3-19. Simulación de respuesta del controlador difuso.....	72
Figura 3-20. Interpretación gráfica del proceso de defuzzificación.....	75
Figura 3-21. Áreas cortadas superpuestas de funciones de pertenencia de salida.....	75
Figura 3-22. Arquitectura del hardware del sistema de control difuso.....	76
Figura 3-23. Prueba de conexión con la red de SCADA de la fase II.....	78
Figura 3-24. Flujograma de conexión OPC.....	79
Figura 3-25. Conexión cliente y servidor OPC para el PLC AC800M de ABB.....	80
Figura 3-26. Prueba de lectura de nivel de agua de la cámara II.....	81
Figura 3-27. Esquema de conexión cliente y servidor OPC para el PLC Alspa C80-35.....	82
Figura 3-28. Bucle de ejecución infinita temporizada de labVIEW.....	85
Figura 3-29. Bloque de Fuzzy Controller.....	85
Figura 3-30. Prototipo del interfaz de usuario principal.....	87
Figura 3-31. Pantalla de tendencias de variables (p.u.).....	88
Figura 3-32. Interfaz de monitoreo de las variables locales del programa.....	89
Figura 4-1. Tendencia de nivel de agua de la cámara de carga II y potencia del generador Pelton.....	91
Figura 4-2. Tendencia de nivel de agua en la cámara de carga II y la salida del controlador difuso en MW.....	93
Figura 4-3. Tendencia de error y pendiente de nivel de agua en la cámara de carga II.....	94
Figura 4-4. Resultados de la prueba del controlador difuso variando la referencia del porcentaje de apertura de los inyectores del grupo Pelton.....	96
Figura 4-5. Resultados de las pruebas finales del sistema de control automático.....	97
Figura 4-6. Resultados de las pruebas finales del sistema de control automático.....	98
Figura 4-7. Análisis de los parámetros de grupo Francis durante la prueba.....	99
Figura 4-8. Tendencia de apertura de los inyectores de la turbina Pelton.....	100
Figura 4-9. Registro de caudal del río, caudal turbinado total y potencia total de la planta.....	101
Figura 4-10. Interfaz de usuario unificado para los tres grupos Pelton.....	102
Figura 4-11. Interfaz de usuario implementado, panel de tendencias.....	103
Figura 4-12. Puesta en funcionamiento del sistema de control difuso.....	104

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. FAM para un controlador clásico tipo PD. ....	33
Tabla 3-1. Características de software LabVIEW y MATLAB .....	44
Tabla 3-2. Registro de valores típicos de nivel de agua de la cámara de carga II del año 2017. ....	63
Tabla 3-3. Desfase entre la señal original y el promedio móvil calculado.....	65
Tabla 3-4. Atenuación en la amplitud de la señal de ruido. ....	65
Tabla 3-5. Definición de funciones de pertenencia del error. ....	66
Tabla 3-6. Definición de funciones de pertenencia de la pendiente de error. ....	69
Tabla 3-7. Definición de funciones de pertenencia de la salida (Apertura). ....	70
Tabla 3-8. Matriz de Asociación Difusa (FAM). ....	72
Tabla 3-9. Variables de conexión OPC con el PLC Alspa C80-35.....	83
Tabla 4-1. Matriz de asociación difusa con nueve funciones de pertenencia proporcional. ....	91
Tabla 4-2. Matriz de asociación difusa con 27 reglas de control difuso. ....	92
Tabla 4-3. Matriz de Asociación Difusa de la prueba final.....	96
Tabla 5-1. Resumen de las actividades desarrolladas .....	106
Tabla 5-2. Cuadro de costos de mano de obra.....	106
Tabla 5-3. Cuadro de presupuesto .....	107



## TERMINOLOGÍA

COES-SINAC	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional
DSC	Datalogging and Supervisory Control (Módulo de registro de datos y control supervisorio de LabVIEW)
EGEMSA	Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.
ERROR	Desviación del nivel de agua con respecto al punto de referencia
FAM	Matriz de reglas difusas
FRANCIS	Tipo de turbina hidráulica inventado por James B. Francis
INYECTOR	Dispositivo mecánico oleo hidráulico actuador del regulador de velocidad y carga que permite el control de chorro de agua
IP	Protocolo de internet
MISO	Múltiples entradas y una salida
MW	Unidad de potencia activa en Mega Watt
NI	National Instrument (Empresa que desarrollo el Software LabVIEW)
OLE	Object Linking and Embedding (Acrónimo de incrustación y enlazado de objetos).
OPC	OLE for Process Control (OLE para control de procesos)
OSI	Open System Interconnection (Modelo de interconexión de sistemas abiertos).
PELTON	Turbina hidráulica inventado por Lester Allan Pelton
PENDIENTE	Tasa de cambio del nivel de agua por unidad de tiempo.
PID	Tipo de control Proporcional Integral Derivativo
PLC	Controlador lógico programable
REMOTO	Modo de operación de un equipo que espera instrucciones a distancia
RPF	Regulación Primaria de Frecuencia en el SEIN (Procedimiento 21 COES-SINAC)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, control y adquisición de datos)
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
TCP	Protocolo de Control de Transmisión

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1. El problema

#### 1.1.1. Descripción del problema

La Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A. (EGEMSA) es una empresa dedicada a la generación y comercialización de energía eléctrica, producida utilizando los recursos hídricos que el río Vilcanota le provee. Las primeras edificaciones se hicieron en los años 60 y 80, sin embargo, en el año 1998, el deslizamiento que ocurrió en la quebrada Aobamba, dejó sepultada a la central; en consecuencia, se iniciaron dos proyectos de rehabilitación en dos fases:

- El primero consistió en la recuperación de la central (fase I), puesta en marcha en el año 2001 de tres grupos Pelton reparados de 90 MW en total (cada uno de 30 MW).
- El segundo proyecto consistió en la construcción de un nuevo grupo de turbina Francis (fase II), que concluyó en el año 2015 con la puesta en servicio, con una potencia de 102 MW. En este último se construyó una nueva casa de máquinas subterránea, un conducto forzado adicional, una nueva cámara de carga que comparte el túnel de aducción de la fase I y en la represa se agregó cuatro naves desarenadoras para aumentar la capacidad de flujo hasta  $61\text{m}^3/\text{s}$  en total.

En dicha planta eléctrica, como consecuencia de las modificaciones en la construcción del nuevo grupo; las técnicas de aprovechamiento de bajos recursos hídricos del río Vilcanota han cambiado. Uno de los procesos en el que incide este proyecto es en la conducción e ingreso a la tubería forzada.

El sistema mostrado en la Figura 1-1 es el circuito hidráulico de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu: el primero, es el circuito de las turbinas Pelton y el segundo, es el circuito hidráulico de la turbina Francis; ambas tienen una cámara de carga que están ubicadas en la misma cota.

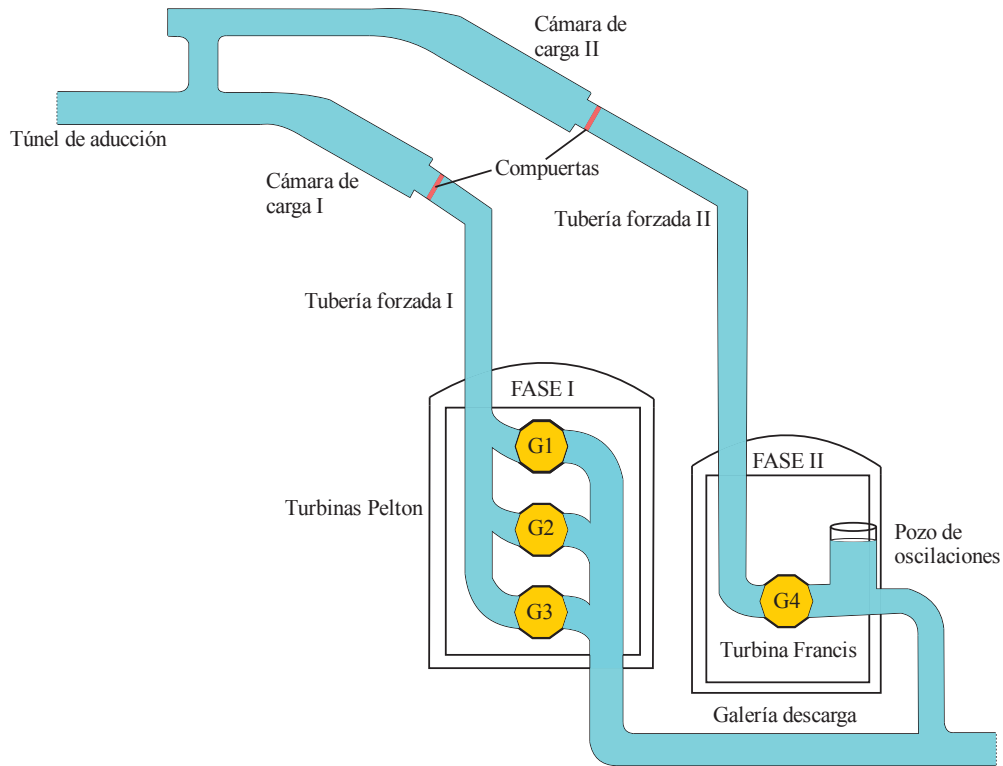


Figura 1-1. Esquema del circuito hidráulico de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre las dos cámaras de carga es la forma de recepción de agua del túnel de aducción, como se puede ver en la figura anterior; la desviación de agua hacia la cámara de carga II es en 90 grados, este hecho, es una de las causas para que el nivel de agua en esta cámara sea mucho más variable que en la cámara de carga I.

En la escala de medición de nivel de agua en la cámara de carga de la planta, con la referencia de 0.0 m en el borde de rebose, es decir, el valor de nivel es positivo cuando está por encima del rebose y negativo cuando está por debajo del rebose. El rango de valores aceptables de nivel de agua está definido, según el manual de operación, como sigue:

- Cámara de carga I:  $-0.20$  m a  $-0.40$  m.
- Cámara de carga II:  $-0.50$  m a  $-0.90$  m.

Los factores que modifican el nivel de agua en las cámaras de carga I y II de la Figura 1-1 son los

siguientes:

- Aumento de carga en el sistema eléctrico (SEIN): el ingreso de carga al sistema eléctrico ocasiona un incremento adicional en la generación; por lo tanto, esta variación de potencia eléctrica hace que los grupos tiendan absorber más agua de la cámara de carga, por consiguiente, el nivel de agua tiende a bajar hasta por debajo de los valores aceptables.
- Salida de carga del sistema eléctrico: ante una salida de carga del sistema eléctrico los generadores disminuyen la potencia de manera automática, esto se traduce, también, en la disminución de consumo de agua acumulándose en la cámara de carga, en ocasiones hasta rebosar.
- Captación y limpieza de agua del río en la represa: la acumulación de residuos sólidos flotantes en las bocatomas y la acumulación de los sedimentos en los canales de conducción hacia los desarenadores reduce el caudal del túnel de aducción, lo cual, también afecta al nivel de agua en la cámara de carga.
- Climatológicas: lluvias irregulares que dependen de las estaciones del año, utilización de agua para el riego en la agricultura en épocas de sequía en el valle del río Vilcanota; estos factores ocasionan variación del caudal de agua que ingresa al túnel de aducción y posteriormente al nivel de agua en la cámara de carga.

Desde el ingreso en operación del grupo Francis, el nivel de agua en la cámara de carga II, viene siendo controlado manualmente variando la potencia generada por uno de los grupos Pelton. El operario, desde el centro de control, modifica el porcentaje de apertura de los inyectores de la turbina Pelton (disminuyéndola o aumentándola) para compensar el nivel de agua con la ayuda de una regla métrica pegada en la pared de la cámara de la carga II y una cámara de video vigilancia. Cuando el nivel de agua tiende a bajar más de lo normal, el operario, disminuye la potencia, con la finalidad de desviar más agua a la cámara de carga II hasta que su nivel tenga el valor normal

de operación. Caso contrario, cuando el nivel de agua tiende a aumentar, el operario, sube la potencia para evitar la acumulación y rebose.

La turbina Francis, por el principio de funcionamiento, es más sensible a las variaciones de presión y flujo en la tubería forzada. El nivel de agua en la cámara de carga II no debe bajar de los límites establecidos, se tiene que bajar la potencia del generador Pelton para compensar y evitar posible ingreso de aire a la tubería forzada II que causaría oscilaciones de presión en dicho conducto y ocasionando daños o funcionamiento anómalo de la turbina Francis. Sin embargo, en la regulación manual se observó que el valor del nivel de agua, en ocasiones, alcanzó por debajo del mínimo aceptable hasta  $-1.80$  m en la cámara de carga II, lo cual, es peligroso para la turbina Francis. Este hecho causado por el descuido del control humano o por otros factores en el sistema, pone en riesgo, principalmente, a la turbina Francis y a los equipos asociados; las consecuencias pueden ser las siguientes:

- Cuando el nivel de agua es muy bajo, existe la posibilidad de ingreso de aire a la tubería forzada que ocasionaría pulsaciones y oscilaciones de presión en el circuito hidráulico; es decir, principalmente, dañarían a los equipos asociados a la turbina Francis.
- Ocasionaría la formación de vórtices o remolinos de agua en la turbina.
- Incremento de niveles de vibración en la turbina.
- Pérdida de eficiencia y/o reducción de vida útil de la turbina.

### **1.1.2. Formulación del problema**

Las variaciones pronunciadas de nivel de agua en la cámara de carga sumado con la regulación por métodos tradicionales, pone en riesgo a la operación eficiente de la turbina Francis y a los equipos asociados en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.

### 1.1.3. Antecedentes

Existen artículos científicos que abordan el tema de control de nivel de agua en la cámara de carga, generalmente de la turbina Francis, en las centrales de pasada de río, utilizando las teorías clásicas de control. En la mayoría, el tipo de control que emplearon es PI convencional con modelamiento y simulación en Matlab, en los siguientes párrafos se resume uno de estos artículos similares obtenidos del portal [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net).

Los autores (Sarasúa et al, 2014, p. 1) sostienen que las centrales hidroeléctricas que funcionan con desviación del curso del río, generalmente, carecen de capacidad de almacenamiento; por tanto, la estrategia de control más adecuada consistiría en mantener un nivel constante de agua en el estanque de admisión (cámara de carga) a fin de aprovechar la máxima cantidad de energía a partir de la corriente del río. Los autores estudiaron un sistema de control PI, llevaron a cabo un análisis de estabilidad basada en el criterio de Routh-Hurwitz, y propusieron un criterio práctico para sintonizar las ganancias del controlador PI. Una central hidroeléctrica típica de desviación del curso del río con una turbina Francis, según los autores, tiene el siguiente esquema de control.

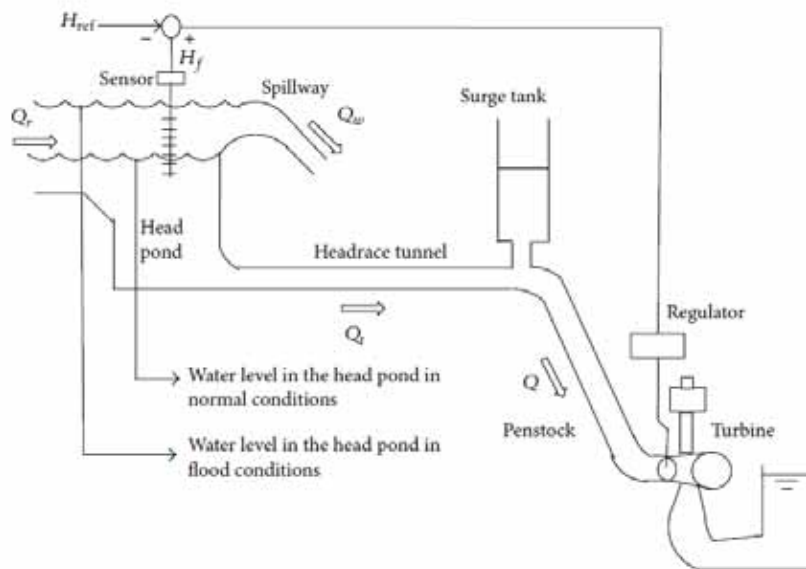


Figura 1-2. Central hidroeléctrica típica de desviación del curso del río.

Fuente: (Sarasúa et al, 2014, p. 3).

Donde: cámara de carga (head pond), canal de desborde (spillway), túnel de conducción (headrace tunnel), chimenea de equilibrio (surge tank ), tubería forzada (penstock), regulador de carga (regulator) y turbina.

La ecuación del sistema hidráulico en la cámara de carga del esquema de control anterior es la siguiente:

$$A_f * \frac{dH_f}{dt} = Q_t - Q_w - Q \quad (1-1)$$

Donde:

$H_f$ : representa el nivel de agua en la cámara de carga.

$A_f$ : área superficial de la cámara de carga en  $m^2$ .

$Q_w$ : caudal de rebose, normalmente es cero; esto significa que toda el agua proveniente del túnel de aducción es turbinada.

$Q_t$ : caudal de túnel de aducción que depende del caudal del río.

$Q$ : representa el caudal de la tubería forzada.

La ecuación de  $Q$  depende de muchas variables, tales como la velocidad de agua, salto geodésico, apertura de los álabes y pérdidas, sin embargo, los autores lo escriben como una función que depende del caudal, altura de caída y apertura de los álabes directrices de la siguiente forma:

$$Q = f_Q(H, X) \quad (1-2)$$

Donde:

$H$ : salto neto geodésico.

$X$ : porcentaje de apertura de los alabes directrices.

Otros autores como (Jiménez y Hanif, 1992, p. 183) aproximan esta ecuación de la siguiente forma:

$$Q = xQ_0 \sqrt{\frac{H_s}{H_0}} \quad (1-3)$$

Donde:

$x$ : porcentaje de apertura de los álabes directrices.

$H_s$ : salto neto.

$H_0$ : salto neto en estado de equilibrio.

$Q_0$ : flujo de agua en la turbina en estado de equilibrio.

Según los autores, utilizando el criterio de sintonización PI, aplicaron el análisis de estabilidad en la fase de diseño de la Central Hidroeléctrica Ocaña II, Ecuador. Obtuvieron la respuesta de la planta por medio de simulaciones con un modelo más detallado. Encontraron que los resultados obtenidos son útiles para el proceso de diseño y se pueden usar en la implementación del sistema de control. Los mismos autores consideraron dos casos para evaluar la respuesta de la planta. El primer caso, evaluaron la estabilidad del nivel de agua con referencia por debajo del rebose en la cámara de carga (condición normal). En el segundo caso, el nivel de agua de referencia está sobre el rebose (condición inundada). Con esto, han demostrado que la existencia de un vertedero en el análisis mejora la estabilidad del control de nivel de agua en la cámara de carga. Cuando la dinámica del aliviadero está incluida (modo de operación de inundación), la región de estabilidad cubre un área más amplia que en el modo de funcionamiento normal (sin rebose).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar un sistema de control automático basado en lógica difusa, en función al nivel de agua en la cámara de carga II y apertura de los inyectores de la turbina Pelton en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Diseñar el controlador difuso.
2. Describir el modelo dinámico de la planta.
3. Implementar la comunicación entre el controlador difuso y el controlador de carga de un



- grupo generador Pelton.
4. Diseñar e implementar un interfaz de usuario, para realizar las pruebas de funcionamiento del controlador diseñado.
  5. Recabar datos históricos del nivel de agua en la cámara de carga II, caudal del río, del túnel de aducción, de tubería forzada y analizar los registros obtenidos.

### **1.3. Justificación**

En el funcionamiento de la turbina Francis, es necesario mantener un nivel de columna de agua constante y el caudal cercano al valor nominal. Tiene mayor rendimiento cuando estos parámetros son del diseño. La velocidad y la dirección de incidencia de flujo en los álabes del rodete varía con el caudal; esto provoca pulsaciones de presión y aumento de vibraciones que redundan en la caída del rendimiento de la turbina.

Ante las variaciones constantes del nivel de agua en la cámara de carga II, es necesario implementar un sistema de control automatizada que reemplace el control manual realizado por un operario. El aumento progresivo del caudal en el túnel de aducción se aprovecha ajustando gradualmente la potencia del generador seleccionado para la regulación de nivel de agua en la cámara de carga; en caso contrario, ante la falta de agua, bajar oportunamente la generación. Esta operación es continua que amerita ser realizado por un sistema automático.

El sistema hidráulico mostrado en la Figura 1-1, es un sistema no lineal, se desconoce el modelo matemático exacto, además resulta complicado analizar las ecuaciones diferenciales para una planta que tiene dos cámaras de carga y cuatro grupos que están en funcionamiento al mismo tiempo. Este hecho fomenta buscar nuevas soluciones de control, basados en conocimiento con razonamiento aproximado. El sistema difuso es una herramienta intuitiva para controlar este tipo de sistema que necesita ser automatizada, con grado de error flexible.

La utilidad del sistema de control basado en lógica difusa será controlar el nivel de agua en la

cámara de carga II, incrementando o disminuyendo la apertura de los inyectores de la turbina Pelton. Tiene la finalidad de mantener un nivel de agua constante en dicha cámara de carga y abastecer con un flujo necesario, con lo cual, la turbina Francis funcione de manera eficiente y así aprovechar al máximo el escaso recurso hídrico en la Central Hidroeléctrica de Machupicchu.

#### **1.4. Limitación**

El diseño del sistema de control automático no contempla el proceso de arranque, parada y falla de los generadores.

La implementación de este proyecto es para hacer pruebas a fin de validar el diseño del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II con un grupo generador Pelton.

#### **1.5. Alcance**

Los alcances de este proyecto son: el diseño de un sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II, con un generador de turbina Pelton, basado en lógica difusa, utilizando datos históricos de nivel de agua obtenida mediante la regulación manual, e implementación de un interfaz de usuario para realizar las pruebas de funcionamiento del controlador difuso, cuyos resultados serán evaluados por la empresa generadora para su implementación definitiva.

#### **1.6. Identificación de variables**

**Variable controlada:**

- Nivel de agua en la cámara de carga II

**Variable manipulada:**

- Apertura de los inyectores de la turbina Pelton o potencia del generador Pelton

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Central hidroeléctrica de agua fluyente

También denominada central hidroeléctrica de pasada de río; es un tipo de centrales donde se transforma la energía hidráulica en energía eléctrica, aprovechando el salto geodésico que presenta el cauce natural del río, su principal característica es el funcionamiento continuo porque no tienen capacidad para almacenar agua al no disponer de una represa. Generalmente las turbinas son de eje vertical, cuando el río tiene una pendiente mayor de 200 m.

Un ejemplo de este tipo es la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, el salto neto promedio que presenta es 360 m, el caudal promedio que existe en el río Vilcanota permite el uso de turbinas Pelton y Francis.

##### 2.1.1. Partes de una central hidroeléctrica

**Represa:** es una barrera construida en el cauce de un río, con la finalidad de embalsar el agua del cauce fluvial para elevar su nivel, con el objetivo de derivarla mediante bocatomas, que esta provista de rejas para retener objetos de gran tamaño y flotantes, para su conducción hacia las naves desarenadoras, en esta el agua fluye lentamente para sedimentar la arenilla disuelta u objetos pesados. Una gran parte del material sólido se deposita en el fondo de los canales disminuyendo su sección, con lo cual, reduce el ingreso de agua al túnel de aducción.

**Túnel de aducción:** es un tramo de conducción bajo la superficie del suelo, la entrada está constituida por la toma de agua después de los desarenadores, conduce el agua desde la represa hasta la cámara de carga. Generalmente está abierta, no tiene compuertas de control de flujo. Es el principal canal de conducción, que permite conseguir el salto neto necesario para una central hidroeléctrica.

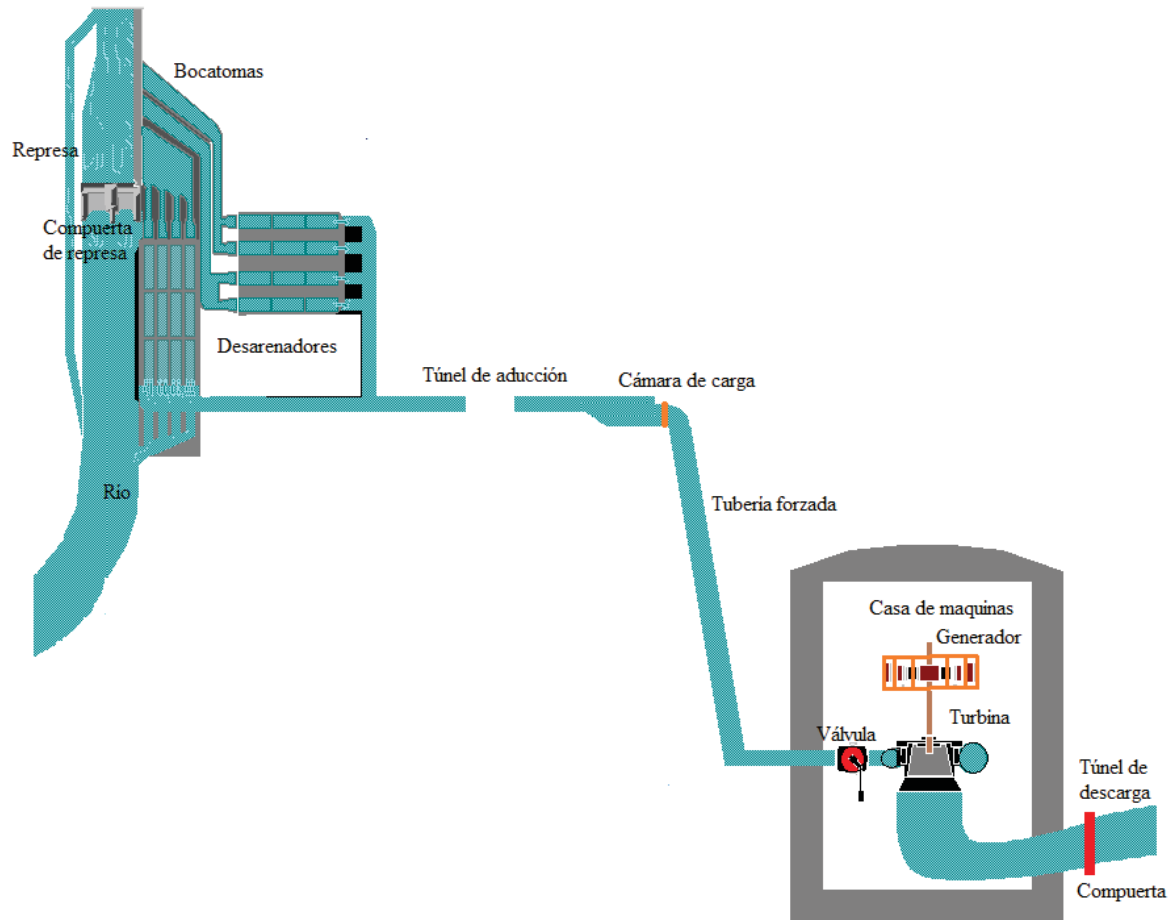


Figura 2-1. Partes de una central hidroeléctrica de pasada de río.

Fuente: Elaboración propia

**Cámara de carga:** es el primer receptor del agua del túnel de aducción, donde se distribuyen a las tuberías forzadas que la conducen hacia las turbinas. Está diseñada para actuar como una pequeña represa de agua, para mantener la presión de caída en la tubería forzada, que requiere una entrada continua de agua del canal para mantener su nivel constante. Cuenta con un vertedero para desviar el exceso de agua.

Esta estructura hidráulica sirve para acumular un volumen necesario de reserva de agua, que permite satisfacer las pequeñas variaciones de carga de las turbinas, y garantizar la sumergencia del sistema de conducción de alta presión, manteniendo una altura de agua suficiente que evite la entrada de aire a los equipos de generación.

**Tubería forzada:** conducto de entrada del agua a la máquina a alta presión. Es el tramo final de la conducción. Como su nombre lo especifica, es la que soporta las máximas presiones internas causadas por el agua. Cuentan con válvulas disipadoras de energía y de admisión para regular el flujo hacia las turbinas.

**Casa de máquinas:** es la edificación donde se produce la energía eléctrica. Consta de varias partes. Entre las más importantes se encuentran las unidades de generación, la sala de control y los equipos auxiliares.

**Turbina:** es una máquina hidráulica receptora que transforma energía hidráulica en energía mecánica, mediante el paso de fluido por su interior, dichas máquinas se instalan en centrales hidroeléctricas, donde se aprovecha la energía acumulada en un salto de agua, para generar electricidad a través de un generador acoplado con el eje de la turbina. Las turbinas se clasifican en dos grupos: turbinas de reacción y turbinas de acción o impulso.

- Las turbinas de reacción extraen la potencia de la acción combinada de la energía de presión y la energía cinética del agua. Se refiere a ese tipo de turbinas Francis (las más utilizadas) y las Kaplan. Las turbinas Francis se instalan en saltos medianos aproximadamente de 30 y 600 metros, en los caudales de mayor proporción. Finalmente, las turbinas Kaplan son óptimas para saltos muy pequeños y caudales grandes.
- Las de impulso obtienen potencia a partir de la energía cinética, de uno o más chorros de agua a alta velocidad. En este segundo grupo están las turbinas Pelton, que se utilizan únicamente en caso de saltos muy elevados y caudales relativamente bajos.

**Generador:** Es la máquina que transforma la energía mecánica en eléctrica. Se le llama también alternador, porque produce corriente alterna.

Está formado básicamente por dos elementos: uno de ellos es fijo cuyo nombre genérico es Estator y otro que gira concéntricamente en el primero, llamado Rotor.

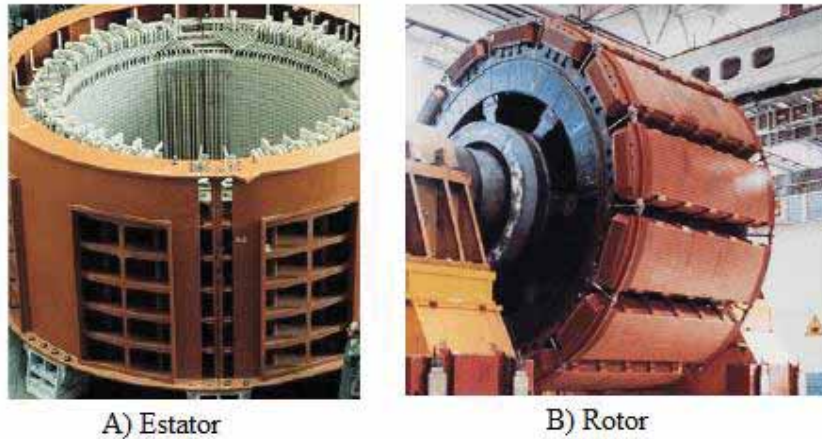


Figura 2-2. Partes del alternador, a) Estator o inducido, b) Rotor o inductor

Fuente:

[https://www.academia.edu/32494107/PARTES\\_DE\\_UNA\\_CENTRAL\\_HIDROEL%C3%89CTRICA](https://www.academia.edu/32494107/PARTES_DE_UNA_CENTRAL_HIDROEL%C3%89CTRICA)

El rotor crea un campo magnético, alimentado con corriente directa (corriente de excitación del campo), tomada de la excitatriz. Dicho elemento se le denomina inductor y está formado por un conjunto de bobinas. El segundo elemento actúa como receptor de corrientes inducidas, por lo que se denomina inducido, al cual, están unidas las barras de salida de la corriente alterna.

El estator es el que ocupa el lugar del inducido. La corriente eléctrica se origina en el campo magnético establecido entre el rotor y el estator; al girar el rotor impulsado por la turbina se rompe el campo magnético, produciéndose una corriente de electrones. Esta corriente se induce relativamente a bajo voltaje, por lo que se envía al transformador de potencia, el cual sube el voltaje a un valor muy alto para que se efectúe la transmisión hasta los centros de consumo. Existen subestaciones reductoras, cuyos transformadores reducen el voltaje para distribuir la corriente en la zona. Finalmente, cerca de las instalaciones del usuario ocurre una última reducción del voltaje. El fenómeno físico mediante el cual se obtiene la transformación de niveles de tensión, se denomina inducción electromagnética.

### 2.1.2. Sistema de control de velocidad y carga de la turbina

Uno de los sistemas de control es el regulador de velocidad y carga; es un sistema de control

asociado a la unidad generadora que permite mantener constante la velocidad de la máquina, indirectamente controla la frecuencia del sistema eléctrico.

En el diagrama esquemático mostrado en la Figura 2-3 se observa que el regulador de velocidad recibe como entrada, la señal de velocidad de la máquina y la compara con la velocidad de referencia, si estas son iguales, la señal de error será cero que indica que, el regulador no debe originar cambios en las condiciones de operación, dado que la máquina está en la velocidad deseada. De ser diferentes estas señales se generará un error, la misma será captada por el regulador que ejercerá la función de control, ordenando al accionador a través del servomotor de abrir o cerrar los alabes o inyector ya sea una turbina Francis o Pelton respectivamente. Esta acción permitirá en la turbina aumentar o disminuir la potencia mecánica de la unidad para corregir la desviación de velocidad.

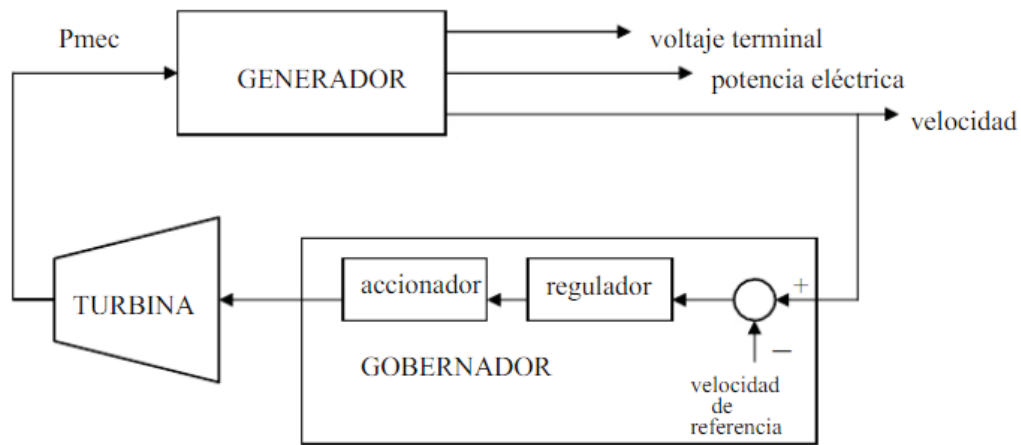


Figura 2-3. Diagrama esquemático del generador-regulador-turbina.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/98950683/Capitulo-2-Gobernador-de-Velocidad-SISTEMAS-DE-POTENCIAS-II>

El regulador indirectamente permite mantener la frecuencia constante y satisfacer la carga. La expresión que relaciona la velocidad sincrónica con la frecuencia eléctrica viene dada por:

$$RPM = \frac{120 * f}{p} \quad (2-1)$$

Al analizar esta expresión se concluye, que el número de polos ( $p$ ) una vez que la máquina está construida es un parámetro fijo, la velocidad constante indicará una frecuencia constante, es decir, al controlar la velocidad se garantiza el control de la frecuencia ( $f$ ). De igual forma sucede con el control de la carga; cuando ocurre en el sistema eléctrico un incremento de la potencia eléctrica de carga, se tiene momentáneamente una potencia eléctrica mayor a la potencia mecánica ( $P_e > P_{mec}$ ), provocando una potencia des acelerante, que reducirá la velocidad en la máquina. Esta variación en la velocidad es detectada por el regulador, quien ordena un incremento en la apertura de álabes o inyector para incrementar la potencia mecánica, y de esta forma retornar la velocidad al valor de referencia, este equilibrio se alcanza cuando la potencia mecánica y eléctrica son iguales ( $P_{mec}=P_e$ ), con lo cual se satisface la carga. El regulador de velocidad al igual que los diferentes sistemas de control como la excitatriz ha tenido cambios tecnológicos que han mejorado su comportamiento. Los primeros reguladores eran enteramente electromecánicos, evolucionando a lo largo de los años a reguladores de tipo electrónicos (control PID), hasta alcanzar los existentes en la actualidad de tipo numérico. El principio de la estructura de estos reguladores es similar a la indicada en la Figura 2-4, que consta de una unidad reguladora que tiene como función detectar las variaciones de velocidad de la unidad, para originar una señal de corrección que es enviada a la unidad accionadora para corregir la desviación. El accionador está constituido por equipos mecánicos que tienen como función convertir las señales eléctricas del regulador en señales mecánicas para accionar los servomotores y mover las paletas en la turbina.

El cambio radical de este tipo de reguladores se presenta a nivel del regulador de velocidad, donde los elementos mecánicos fueron sustituidos por componentes electrónicos, que les agregaron una mayor velocidad de respuesta y una mayor sensibilidad a variaciones de la velocidad. A pesar de estas mejoras el regulador de velocidad sigue siendo, al compararlo con la excitatriz, un sistema de control lento con tiempos de respuesta en el orden de los segundos. Desde el punto de vista del sistema de regulación los elementos electrónicos permiten tiempos de respuesta en milisegundos,



sin embargo, los elementos restrictivos están a nivel del servomotor y en la turbina. Estos componentes son mecánicos y requieren grandes niveles de energía para variar su condición de operación; en este sentido a pesar de que el regulador pueda responder en milisegundos, es necesario colocarle constantes el tiempo que permitan una respuesta en segundos, para que la señal de corrección pueda ser seguida por la velocidad de respuesta de los elementos mecánicos. Donde el elemento regulador de velocidad es representado por un proporcional-integrativo-derivativo (PID), el servomotor es modelado por un integrador con su limitador a la salida y cuenta con el lazo de realimentación, representado por el bloque R.

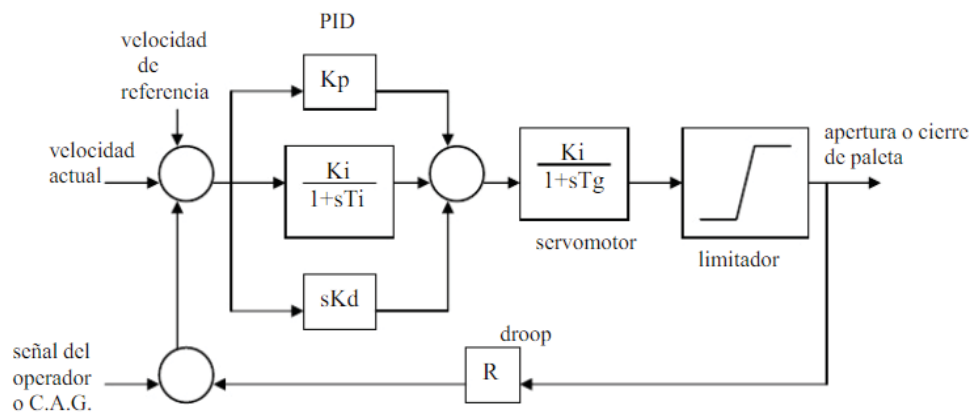


Figura 2-4. Modelo general de un regulador electrónico.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/98950683/Capitulo-2-Gobernador-de-Velocidad-SISTEMAS-DE-POTENCIAS-II>

### 2.1.3. Potencia eléctrica de una central hidroeléctrica

En general, estas centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua, en un cauce natural en virtud de un desnivel, conocido también como salto geodésico. En su caída entre dos niveles del cauce del río, el agua pasa por una turbina hidráulica que transmite energía a un generador que transforma en energía eléctrica.

La potencia de una central hidroeléctrica se mide generalmente en megavatios (MW) y se calcula mediante la fórmula:

$$P_e = \rho \cdot 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H \quad (2-2)$$

Donde:

$P_e$ : potencia en vatios (W).

$\rho$ : densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>.

$g$ : aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

$\eta_t$ : rendimiento de la turbina hidráulica (entre 0.75 y 0.94).

$\eta_g$ : rendimiento del generador eléctrico (entre 0.92 y 0.97).

$\eta_m$ : rendimiento mecánico del acoplamiento turbina alternador (0.95/0.99).

$Q$ : caudal turbinada en m<sup>3</sup>/s.

$H$ : salto geodésico neto, en metros.

En una central hidroeléctrica se usa dos términos de potencia:

**Potencia media:** potencia calculada mediante la fórmula anterior considerando el caudal y el salto medio disponible.

**Potencia instalada:** potencia nominal de los grupos generadores instalados en la central.

## 2.2. Teoría de lógica difusa y su aplicación

### 2.2.1. Antecedentes de lógica difusa

En el año 1965, la primera publicación del profesor de la Universidad de Berkeley (California), Lotfi Asker Zadeh, fue el artículo “*Fuzzy Sets*” (Conjuntos difusos). La cual sienta las bases de una nueva forma de lógica. Su objetivo era crear un formalismo que permitiera manejar de manera más eficiente la imprecisión del razonamiento humano. Su metodología ha hecho posible que una computadora analice información del mundo real en una escala entre lo falso y lo verdadero, manejando conceptos vagos, como hacen los humanos.

Desarrollando este concepto, introdujo poco después la lógica difusa, en la que entre lo verdadero

y lo falso existen todos los posibles grados de verdad. De alguna manera, la visión tradicional de que las cosas son “blancas” o “negras” da paso a una escala de grises que enriquece las posibilidades de analizar la realidad.

En 1974, Ebrahim H. Mamdani, diseñó un controlador difuso para un motor a vapor. Desde entonces el término control difuso es sinónimo de cualquier sistema matemático o computacional que razona con lógica difusa. Las aplicaciones de la lógica difusa dieron sus primeros frutos en la década de los 80, como por ejemplo, el metro no tripulado de la ciudad de Sendai en Japón (1987), en el que gracias al carácter “gradual” de las reglas utilizadas, los procesos de arranque y parada del tren se llevan a cabo con una suavidad inusitada.

En la práctica, sus aplicaciones son innumerables y, en las últimas décadas, los sistemas basados en reglas de lógica borrosa se han empleado en electrodomésticos, aires acondicionados, vehículos, cámaras de vídeo, maquinaria industrial o tecnología informática, en el campo de la medicina generando miles de patentes y demostrando la importancia de cuantificar la imprecisión.

### **2.2.2. Lógica difusa**

Según (Ponce, 2010, p. 33) las computadoras manejan datos precisos que se reducen a cadenas de unos (1) y ceros (0) y proposiciones que son ciertas y falsas. En cambio, el cerebro humano puede razonar con información que involucra incertidumbre o juicios de valor como: “el aire es frío” o “la velocidad es rápida”. Además, las personas tienen un sentido común que les permite razonar en un mundo donde las cosas son parcialmente ciertas.

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero. La lógica difusa fue creada para emular la lógica humana y tomar decisiones acertadas, a pesar de la información imprecisa. Es una herramienta flexible que se basa en reglas lingüísticas dictadas por expertos.

La teoría de lógica difusa resuelve problemas subyacentes en el mundo real, por ejemplo muchos

conceptos que maneja el ser humano no tienen una definición clara: ¿a partir de qué edad una persona deja de ser joven? ¿Cuál es la talla alta o baja?

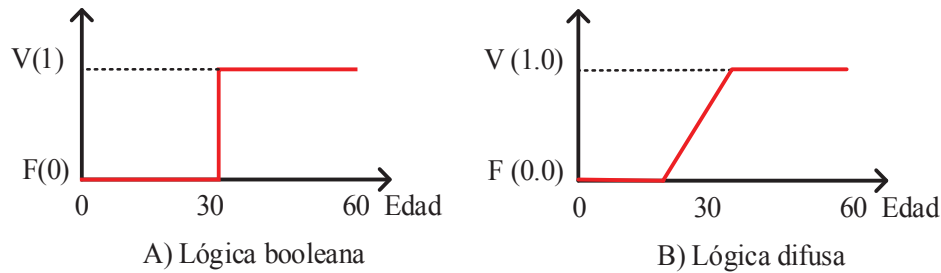


Figura 2-5. Funciones de lógica booleana y difusa

Fuente: (Ponce, 2010, p. 66)

En otras palabras, la lógica difusa es un conjunto de principios matemáticos basados en grados de membresía o pertenencia, cuya función es modelar información. Esta lógica presenta rangos de membresía dentro de un intervalo entre 0.0 y 1.0 (Figura 2-5B), a diferencia de la lógica convencional, en la que el rango se limita a dos valores: Falso o Verdad.

### 2.2.3. Conjuntos difusos

Son conjuntos que no tienen frontera en su lugar tienen grado de pertenencia o función de membresía, para diferenciarse de la lógica booleana o clásica. En la lógica convencional o nítida la función de membresía o pertenencia se resume en dos puntos discretos (0 o 1) como se muestra en la Figura 2-5A. En cambio en la lógica difusa, el grado de pertenencia varía en forma continua desde 0.0 hasta 1.0 Figura 2-5B.

Un conjunto difuso se escribe con una tilde arriba del nombre del conjunto, esta se utiliza para diferenciarlos de los conjuntos nítidos. En la lógica difusa los conjuntos se pueden presentar en forma continua o discreta.

*Conjunto difuso discreto:*

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(X_i)}{X_i} \right\} \quad (2-3)$$

Conjunto difuso continuo:

$$\tilde{A} = \left\{ \int \frac{\mu_A(X)}{X} \right\} \quad (2-4)$$

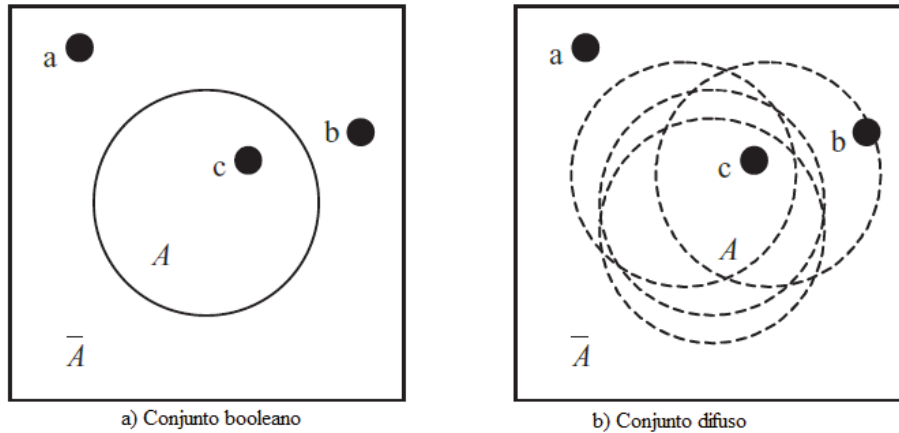


Figura 2-6. Conjunto booleano y difuso

Fuente: (Ponce, 2010, p. 66)

En estos diagramas se observa dos universos, los cuales contienen el conjunto A y su complemento. Cada universo consta de tres elementos. En el primer universo se puede ver que los elementos a y b pertenecen al  $\bar{A}$ , mientras que c pertenece al conjunto A. Sin embargo, en el segundo universo no se puede apreciar si el elemento b está en A o bien en complemento de A. Por esta razón se dice que el primer universo es convencional (nítido) y el segundo es difuso. (Ponce Cruz, 2010, p. 37)

**¿Qué es una variable lingüística?**

Una variable lingüística adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas palabras se pueden representar mediante conjuntos difusos. Una variable numérica toma valores numéricos, por ejemplo: edad = 65, mientras que una variable lingüística

toma valores lingüísticos: edad es “viejo”. Todos los valores lingüísticos forman un conjunto de términos o etiquetas.

#### 2.2.4. Aspectos matemáticos de la lógica difusa

La función de membresía denotado generalmente en los textos por la letra griega  $\mu$  toma valores en el intervalo continuo entre 0.0 y 1.0, donde 0.0 representa falsedad total y 1.0 significa verdad absoluta.

Al igual que en la lógica convencional, hay teorías de conjuntos difusos discretos y continuos, en los sistemas de control difuso generalmente se usan más a menudo conjuntos difusos continuos, teniendo como universo los números reales. Las variables de nivel, caudal, presión etc. Varían de forma continua dentro de un rango del universo. Tenemos como ejemplo la variable nivel y observamos las diferentes formas de representar las funciones de membresía en el siguiente gráfico:

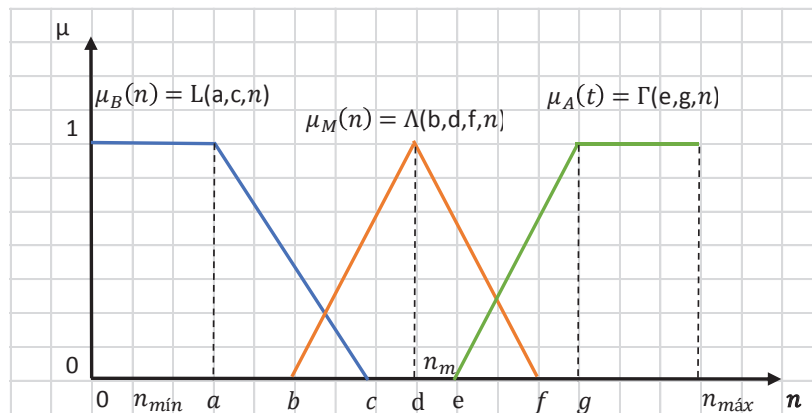


Figura 2-7. Funciones  $L$ ,  $\Lambda$  y  $\Gamma$ .

Fuente: (Robayo, 2007, p. 23)

$N = [n_{\min}, n_{\max}]$ : Universo de Discurso.

$n$ : Variables lingüísticas: {alta, media, baja}

$N_n$ : {alta, media, baja} = {A, M, B}: Conjunto de términos de la variable lingüística.

Algunas propiedades básicas de funciones de membresía son:

**Soporte:** el conjunto de valores de  $N$  para el cual el valor de la función es mayor que cero ( $\mu_M(n) > 0$ ).

**Ancho:** distancia entre el valor más alto y el más pequeño del soporte (ancho de la función  $\Lambda$  es f-b).

**Núcleo:** el conjunto de todos los valores que pertenecen a  $N$ , tal que  $\mu = 1$  (núcleo de función  $L$  es  $[0, \alpha]$ ).

**Altura:** la altura del conjunto  $M$  es el valor más grande de  $\mu_M(n) = 1$ .

**Convexidad:** un conjunto difuso es convexo siempre y cuando solo existe un solo valor máximo dentro del soporte.

Existen operaciones básicas que se definen por operadores binarios para el caso de lógica booleana; en el caso de la lógica difusa se presentan a continuación los operadores que se emplean para realizar las operaciones básicas (unión, intersección y complemento).

Las operaciones básicas entre conjuntos difusos que se definen son la unión, intersección y complemento, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(X) &= \mu_{\tilde{A}}(X) \vee \mu_{\tilde{B}}(X) \\ \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(X) &= \mu_{\tilde{A}}(X) \wedge \mu_{\tilde{B}}(X) \\ \mu_{\tilde{A}}(X) &= 1 - \mu_{\tilde{A}^c}(X)\end{aligned}\tag{2-5}$$

### 2.2.5. Funciones de pertenencia elementales

Para la representación de los grados de pertenencia de cada uno de los elementos que conforman el conjunto difuso, lo más natural es extraer los datos de los fenómenos que se va a representar y con ellos definir la forma de la función de membresía. De otra manera existen metodologías que permiten asignar grados de membresía, a cada uno de los elementos del conjunto.

#### a) Función saturación ( $\Gamma$ )

La función de saturación es la más sencilla de todas. Tiene un valor de 0 hasta cierto punto y después crece con pendiente constante hasta alcanzar el valor de 1, en donde se estaciona. La Figura 2-8 (a) muestra la gráfica de esta función de membresía. Se puede notar que esta gráfica tiene sus cambios de pendiente en los valores  $\alpha$  y  $\beta$ . Este tipo de funciones describe bien la situación en donde se alcanza un nivel máximo a partir de cierto punto.

### **b) Función sigmoide (S)**

La forma de esta función es similar a la de saturación. Sin embargo, como su nombre lo indica, el segmento de subida no es una línea recta, sino una curva de segundo orden, la cual cambia de concavidad en un punto dado, y una vez que llega a 1 se mantiene en este valor. En la Figura 2-8 (b) se muestra una función de este tipo: la gráfica comienza en  $\alpha$ , tiene un cambio de concavidad en  $\beta$  y alcanza el valor máximo en  $\gamma$ .

Esta función también define fenómenos como los definidos por la función de saturación. La diferencia principal radica precisamente en que los cambios de pertenencia a cierto conjunto no son tan drásticos, por lo que se apega más a la realidad. La pertenencia a la clase media basada en el ingreso monetario mensual es un ejemplo que puede ser definido por esta función.

### **c) Función hombro (L)**

Función hombro, que es, por decirlo de alguna manera, la contraparte de la función saturación. En este tipo de funciones se inicia en un valor unitario y se descende con pendiente constante hasta alcanzar el valor de 0. La Figura 2-8 (c) muestra la gráfica de esta función de membresía, la cual tiene sus cortes en  $\alpha$  y  $\beta$ .

Este tipo de función es útil cuando el grado de pertenencia es el total en valores pequeños y decae conforme al valor de la variable aumenta; por ejemplo: el nivel de oxígeno en una pecera; mientras el número de peces no sobrepase un límite contemplado, el oxígeno es suficiente; a medida que el



número de peces aumente, el oxígeno será más limitado hasta que llegue el punto que no sea suficiente y los peces llegan a morir.

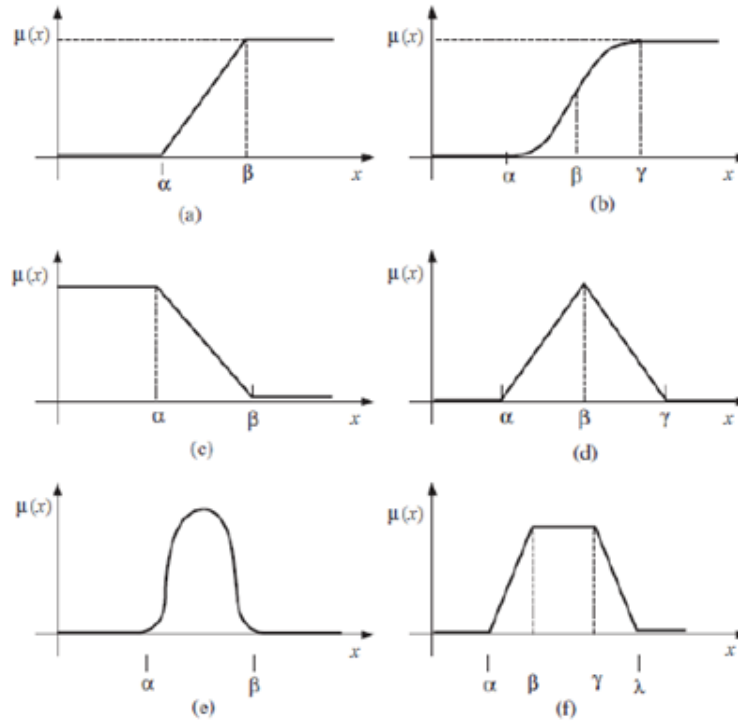


Figura 2-8. Tipos de funciones de membresía: a) Función- $\Gamma$ , b) Función-S, c) Función-L, d) Función- $\Delta$ , e) Función Gaussiana, f) Función- $\pi$ .

Fuente: (Sotelo, 2012, p. 40)

#### d) Función triangular ( $\Delta$ )

Su forma, como su nombre lo indica, consta de una parte de pendiente positiva constante hasta alcanzar la unidad, y una vez que lo ha logrado desciende de manera uniforme. La Figura 2-8 (d) muestra un ejemplo de esta función, la cual tiene comienzo en el valor  $\alpha$  y termina en  $\gamma$ , teniendo el pico en el valor  $\beta$ .

La función triangular es muy adecuada para definir situaciones en las que se tiene un valor óptimo central, el cual se va perdiendo conforme se aleja de él. Un ejemplo de esta situación es la temperatura corporal, que tiene un valor óptimo de 37° centígrados, y debajo de 35° o por encima

de 39° que se considera peligrosa, es decir, el nivel de pertenencia al conjunto de temperaturas seguras en el cuerpo humano es 0.

#### **f) Función gaussiana**

Este tipo de función es una función triangular generalizada, está definida por dos parámetros, el núcleo  $x_0$ , el ancho de la campana  $\sigma$ , cuanto mayor es el valor de  $\sigma$ , más estrecha la campana. Generalmente este tipo de funciones son empleadas cuando se quiere concentrar valores de los fenómenos físicos, cerca al valor central  $x_0$  con alto grado de membresía. Son utilizadas en el diseño de controladores de tipo Sugeno, cuando se conoce la relación de entrada y salida de un sistema de control, que son lineales, con diferentes pendientes para suavizar las transiciones entre las curvas lineales.

#### **g) Función pi ( $\pi$ )**

Una generalización de la función triangular es la función trapecio o función Pi. En el caso de esta función de membresía, no sólo se tiene un valor para el cual, la pertenencia es unitaria, sino toda una franja que varía su ancho dependiendo del fenómeno observado. En la Figura 2-8 (f) se aprecia que la gráfica empieza a crecer de manera constante en  $\alpha$ , llega al valor unitario en  $\beta$  donde se conserva hasta  $\gamma$ , y decrece de manera uniforme hasta  $\lambda$ .

La forma de esta función es muy utilizada, se emplea cuando hay un rango de valores óptimos, al alrededor de los cuales las condiciones no son adecuadas. Un buen ejemplo de esto es la iluminación de un salón de clases. Existe un rango en el cual la iluminación es agradable para las personas, pero por debajo de dicho rango la luz no es suficiente para leer el pizarrón, o por encima de él es molesto para la vista de los estudiantes.

### 2.2.6. Control difuso

La aplicación directa de la teoría de lógica difusa en la industria, son los controladores difusos, estos controladores son sistemas de control basados en conocimientos, conocimiento que son usualmente considerado por modo manual de operación o por otros mecanismos lógicos auxiliares. Por ejemplo, métodos basados en conocimientos empíricos de los operarios de los sistemas de control.

El objetivo principal de la lógica difusa es crear un sistema basada en el comportamiento y pensamiento humano. Esto se logra gracias al planteamiento de un modelo en cualquier contexto y traducirlo a reglas de inferencia difusa. La clave de la lógica difusa se basa en la experiencia. El sistema toma el banco de conocimiento del experto, ya sea de mecánica, construcción, fotografía, computación, etc., y con él crea sus reglas para desarrollar una propuesta.

Cuando no se tiene resultados esperados, se utiliza los sistemas de control no convencionales, bien sea por no linealidad en el proceso, por la presencia de inestabilidad o por los cambios continuos o grandes perturbaciones en el proceso, se hace indispensable buscar otras alternativas, como el control difuso.

Generalmente, la solución difusa se prefiere cuando no hay conocimiento exacto ni completo de la matemática del proceso, cuando las condiciones de operación y las reglas de control se pueden expresar como un conjunto de variables lingüísticas (como por ejemplo: el nivel es alto o bajo), y una serie de reglas extractadas de un conocimiento básico de los que conocen el proceso que se pueden expresar como relación de causalidad: la regla del antecedente y la regla de consecuente o relaciones *si (variable del proceso) entonces (variable de control)*.

Se puede citar como ventaja de aplicación de lógica difusa frente a los sistemas de controles convencionales, según (Ponce, 2010, p. 66):

- Mejorar la robustez que se obtiene con los métodos clásicos de control lineales.

- Diseño de control simplificado para modelos complejos.
- También se obtiene una implementación simplificada.
- Autonomía.
- Adaptabilidad.
- En el caso del control difuso, no es necesario un modelo matemático de la planta.

### 2.2.7. Estructura de control difuso

Un controlador difuso está compuesto de cuatro partes fundamentales fuzzificación , base de conocimiento, lógica de decisiones y defuzzificación . Los cuales se representan en el siguiente diagrama de bloques:

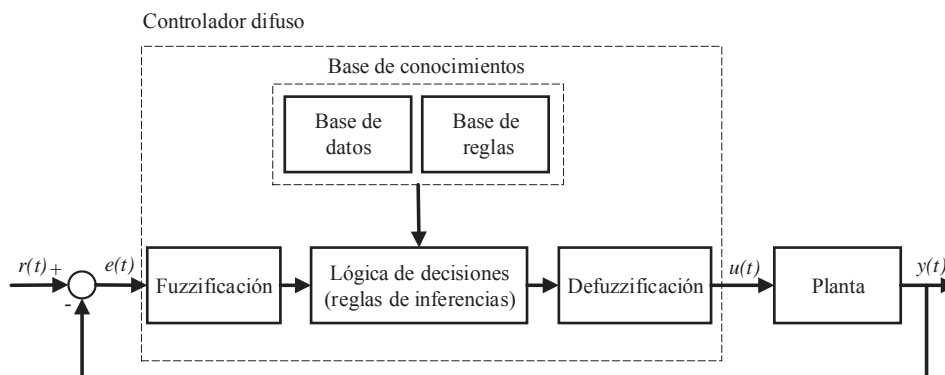


Figura 2-9. Sistema de control difuso realimentado.

Fuente: (Robayo, 2007, p. 71).

### 2.2.8. Proceso de fuzzificación

La fuzzificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos, que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos, para lo cual se fija el universo de la variable a controlar, para cada entrada del controlador difuso. Se debe recordar que el controlador difuso puede tener varias entradas y varias salidas cada una con sus respectivas funciones de pertenencia. Por ende, se determina el número de variables lingüísticas y las formas de funciones de membresía

para cada entrada del controlador.

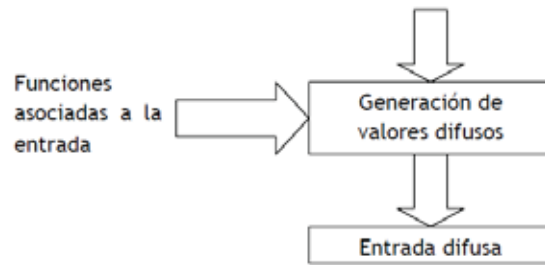


Figura 2-10. Generación de valores difusos.

Fuente: (Sotelo, 2012, p. 38)

El número de conjuntos difusos determina la complejidad del controlador, y éstos tienen un significado lingüístico como “negativo grande”, “cero”, “positivo pequeño”. La Figura 2-11, muestra ejemplos de dos particiones difusas a y b en el mismo universo, normalizado de -1 a +1.

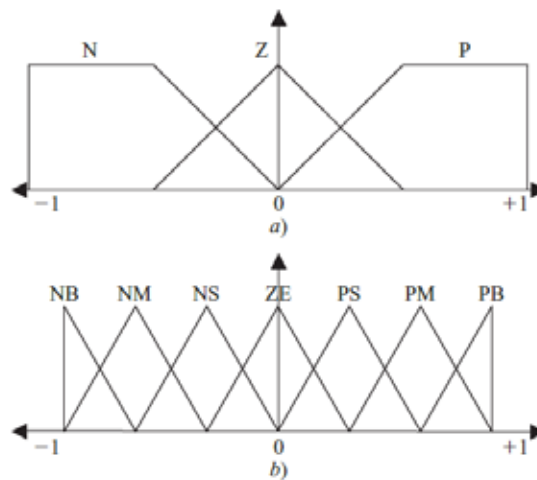


Figura 2-11. Particiones difusas con distinto número de términos: a) tres términos N, Z y P;

b) siete términos NB, NM, NS, ZE, PS, PM y PB.

Fuente: (Ponce, 2010, p. 72)

### 2.2.9. Base de conocimientos

La lógica difusa utiliza reglas lingüísticas para determinar qué acción de control deberá ejecutar, en respuesta a un conjunto de valores de entrada. La base de reglas difusa consiste en un conjunto de reglas lingüísticas de la forma:

*SI  $e(t)$  Negativo ENTONCES  $u(t)$  es Positivo.*

La base de conocimientos contiene toda la información de la aplicación que se va a controlar, así como las metas del controlador. Consta de una base de datos y una base de reglas lingüísticas para controlar la variable. La base de datos proporciona las definiciones para el establecimiento de reglas y la manipulación de datos difusos. La base de reglas caracteriza las metas de control y la política que utilizan los expertos para llevar a cabo el control, empleando proposiciones.

#### **2.2.10. Inferencia difusa**

La lógica utilizada para tomar decisiones dentro de un controlador difuso es el núcleo de este. A partir de la misma se simula la lógica que utilizan en las personas para tomar decisiones, con base de conceptos difusos, la inferencia de acciones de control, empleando implicaciones y las reglas establecidas según la base de conocimientos del experto.

La evaluación de reglas, también referida como inferencia difusa, es aplicada a las entradas difusas, que son transformadas en el proceso de generación de valores difusos, con las cuales es evaluada cada regla.

El proceso de inferencia difusa consiste en determinar el valor de variable de entrada como variable difusa, aplicar las reglas o elegir la regla correspondiente, para determinar el valor de la variable lingüística de salida. Para lo cual, se emplea la teoría matemática de lógica difusa, sobre todo las operaciones de conjuntos difusos, las más básicas son intersección y unión de funciones de membresía.

Existen en los textos por los menos cuatro métodos de inferencia difusa hasta ahora, Mamdani, Larsen, Takagi-Sugeno y Tsukamoto, para el diseño del controlador difuso en este proyecto, se selecciona el método general Mamdani.

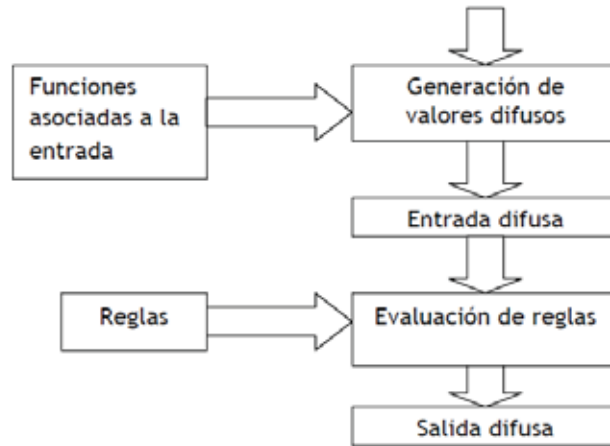


Figura 2-12. Proceso de evaluación de reglas.

Fuente: (Sotelo, 2012, p. 43)

### 2.2.11. Proceso de defuzzificación

El último paso de procesamiento del controlador difuso es la defuzzificación, es el proceso de combinación de todas las salidas difusa en una específica, resultando una salida de valor real, que es el valor de variable de control. La defuzzificación es la herramienta para obtener la acción de control nítida, a partir de una acción de control difusa.

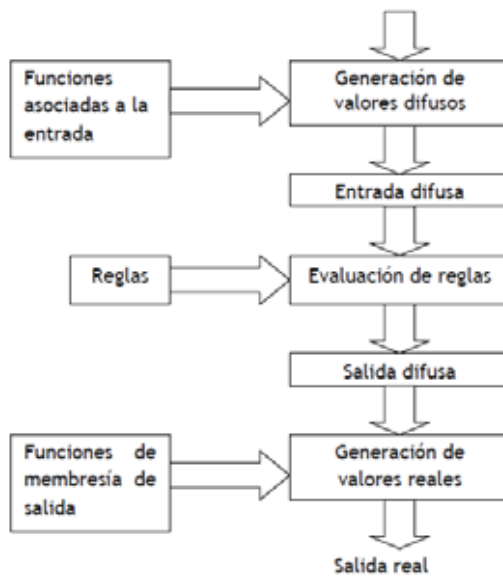


Figura 2-13. Generación de valores reales de salida.

Fuente: (Sotelo, 2012, p. 45)

Algunos métodos para obtener el valor nítido son los siguientes:

- Método de centro de área o gravedad
- Método de centro máximo
- Método de derecha máximo
- Método de izquierda máximo

### 2.2.12. Control tipo Mamdani

En 1974, se realizó la primera aplicación satisfactoria de la lógica difusa para el control de un proceso a escala en un laboratorio, el control de motor de vapor en combinación con una caldera por Ebrahim Mamdani en Reino Unido. En el cual en control clásico es considerado como un sistema altamente no lineal y difícil de controlar.

El control tipo Mamdani es usualmente utilizado como un control de retroalimentación. Mamdani propuso un procedimiento práctico para diseñar un controlador realimentado que comprende los siguientes pasos básicos:

- Siendo el error la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable que se va a controlar, de la Figura 2-9, esto es:  $e_{(t)} = r_{(t)} - y_{(t)}$ , se seleccionan las funciones de pertenencia que realizarán la fuzzificación .
- Se establecen las reglas a partir de proposiciones condicionales, Si-entonces.
- Se seleccionan las funciones de pertenencia para la defuzzificación y el método que se va a usar para encontrar el valor nítido de la salida, normalmente correspondiente al método del centroide:

$$Z_0 = \frac{\int \mu_{(z)} \cdot z dz}{\int \mu_{(z)} dz} \quad (2-6)$$

Donde  $Z_0$ , es una salida real del controlador difuso, los sistemas difusos Mamdani están muy cerca



en la naturaleza del control manual, el controlador define especificando que la salida debe ser de un número de diferentes combinaciones de la señal de entrada. Cada combinación de la señal de entrada se representa como una regla Si – entonces (antecedente - consecuente).

También otros conectores lógicos y operadores pueden ser utilizados, por ejemplo “or” y “not”. En los sistemas difusos tipo Mamdani el antecedente y consecuente son conjuntos difusos, se eligen a menudo el triangular o del tipo Gaussiana. También es común que las funciones de membresía de entrada se superpongan de tal manera que los valores de membresía de las reglas de antecedentes siempre toman la medida de una de ellas.

El sistema de control tipo Mamdani, frente a los otros tipos, es bastante intuitivo, tiene una amplia aceptación y es muy adecuado para sistemas que requieren solucionar problema de control clásico.

### 2.2.13. Controlador difuso clásico

Un controlador difuso clásico tiene un lazo de control mostrado en la Figura 2-14. Al igual que los controladores industriales típicos, contempla el uso de una acción proporcional (P), proporcional-derivativa (PD), proporcional-integral (PI) y proporcional-integral-derivativa (PID).

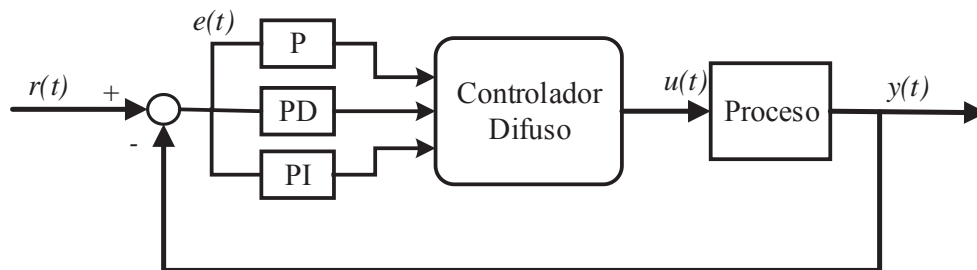


Figura 2-14. Lazo de un controlador difuso clásico.

Fuente: (Ponce, 2010, p. 86)

Partiendo de la respuesta de un sistema a una entrada escalón de ganancia  $r(t)$ , que es el valor deseado del sistema, el cual se muestra en la Figura 2-15; para las funciones de pertenencia de entrada y salida de tipo triangular, con tres términos y las mismas etiquetas para entrada y salida

de la Figura 2-16, es posible diseñar las matrices de reglas para cada tipo de controlador según su acción: controlador P, controlador PD, controlador PI y controlador PID.

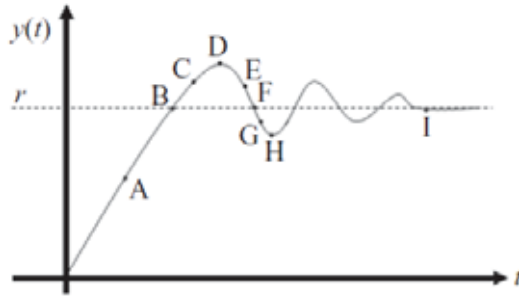


Figura 2-15. Respuesta de un sistema a una entrada escalón  $r$ .

Fuente: (Ponce, 2010, p. 86)

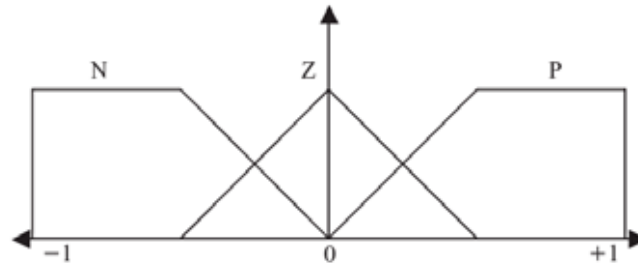


Figura 2-16. Funciones de pertenencia de entrada y salida.

Fuente: (Ponce, 2010, p. 86).

La siguiente tabla resume la matriz de asociación difusa, para un controlador difuso clásico de tipo PD, la salida para este tipo de controlador es  $u = K_p e + K_d \dot{e}$ , donde  $e = r - y$ , haciendo el análisis respectivo para cada punto de la Figura 2-15.

Tabla 2-1. FAM para un controlador clásico tipo PD.

$\dot{e} \backslash e$	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
<b>N</b>	N	N	P
<b>Z</b>	N	Z	P
<b>P</b>	N	P	P

Fuente: (Ponce, 2010, p. 87)

### 2.3. Introducción al sistema SCADA

Según el autor (Rodríguez, 2012, p. 30) lo define como cualquier software que permite el acceso de datos remotos de un proceso y permite, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control de este. Entonces bajo esta definición se determina que este sistema se trata de un software de supervisión que enlaza el flujo de información entre un nivel inferior denominado control y un nivel de almacenamiento de datos históricos, alarmas, visualización, generación de reportes y control a distancia.

Este sistema debe procesar gran cantidad de datos por medio del software instalado en el hardware. Estos dos últimos, deben ser un complemento para el funcionamiento óptimo del sistema. Así mismo, en la industria se hace indispensable la adquisición de las variables del proceso para el control óptimo del sistema. Esto constituye información confiable y oportuna para la toma de decisiones presentes y futuras. Por eso, esta información se puede convertir en una ventaja competitiva de la industria a través de todo el sistema de producción.

**1. Nivel de proceso.** Denominado también nivel de sensor-actuador. Contiene los equipos que tienen contacto directo con las variables del proceso (variables como temperatura, presión, distancia, flujo, nivel, etc.) y realiza el muestreo de estas.

**2. Nivel de control.** También es denominado nivel de campo; por lo general, contiene equipos como los PLC o autómatas programables, estos controladores gestionan y controlan los sistemas de los procesos; por ejemplo, sistemas eléctricos, sistemas de control de temperatura, sistemas de enfriamiento, sistemas de fuerza, sistemas de presión, sistemas de aire acondicionado, entre otros.

**3. Nivel de visualización.** Denominado también nivel de supervisión, en este nivel se encuentra el sistema SCADA, conformado por equipos de cómputo tanto hardware y software, también existen los paneles de control operador de campo con aplicaciones para procesos. Por eso, se debe realizar toda la ingeniería de diseño y la configuración para las pantallas de interface hombre máquina (HMI). Además, este nivel es fundamental para el enlace de nivel de control (nivel 2) con

la transmisión de datos al nivel de información (nivel 4).

**4. Nivel de información y manufactura.** También es denominado nivel de proceso productivo, en este nivel se gestiona toda la información del sistema productivo de la empresa. Existen varios tipos de softwares denominados MRP, los cuales planifican los recursos y materiales para la correcta operación de los procesos de producción.

**5. Nivel de administración.** En este nivel se gestiona los recursos de la empresa a nivel gerencial se maneja procesos productivos, logísticos y contables, los recursos humanos, el proceso de servicio externo, etc. El software que es utilizado en este nivel es denominado ERP (Enterprise Resource Planning).

Un sistema de SCADA completo se muestra en la siguiente figura, sin embargo, en algunas plantas pequeñas, donde la información solo es de importancia operativa y no comercial, solo se implementa hasta el tercer nivel del siguiente esquema piramidal.

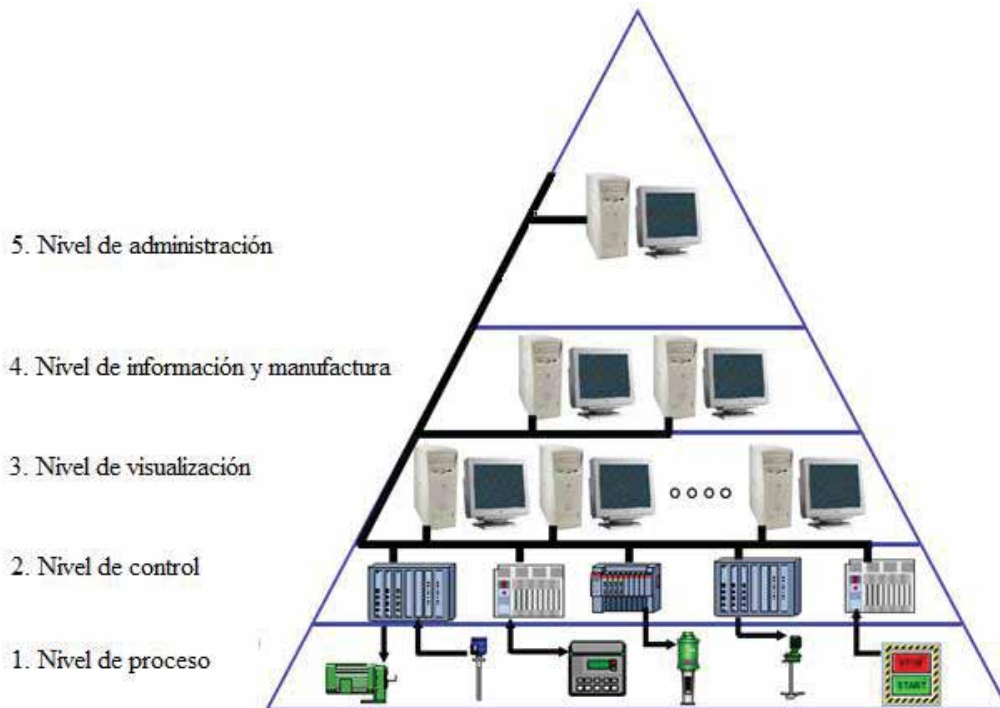


Figura 2-17. Pirámide del sistema SCADA

Fuente: <http://www.sistemasdecontrolindustrial.com/>

### 2.3.1. Arquitectura del sistema SCADA

SCADA es una aplicación de software diseñada para trabajar sobre computadoras (hardware) en el centro de control de la planta que proporciona información, mediante la comunicación entre dispositivos de campo denominados RTU (Remote Terminal Units), donde se encuentran dispositivos como PLCs y otros controladores del proceso de manera automática o manual.

### 2.3.2. Hardware SCADA

En el caso del hardware, este está conformado por los servidores (los cuales son los que recopilan y procesan la información) y por los clientes que son los que utilizan la información y realizan la operación del sistema. A continuación se muestra una arquitectura básica de hardware.

En la siguiente figura se observan los equipos de campo como controladores, conectados y comunicados con los servidores a través de un bus de campo (red industrial). Asimismo, los servidores conectados entre sí y con las estaciones de clientes a través de una red corporativa (LAN – Ethernet).

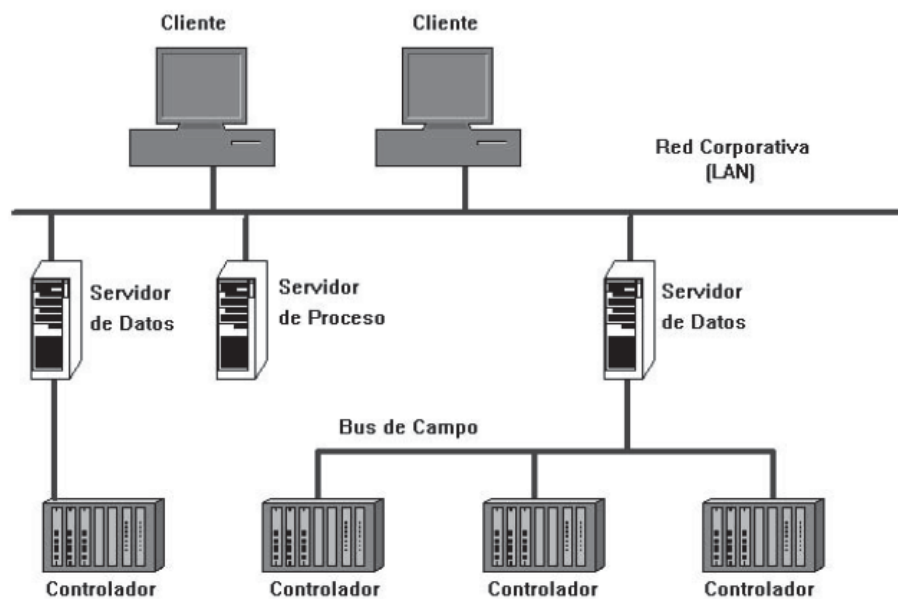


Figura 2-18. Arquitectura básica de hardware del sistema SCADA

Fuente: (Rodríguez, 2012, p. 30)

### 2.3.3. Software SCADA

El software SCADA es un programa que se instala y se ejecuta en una computadora y servidor. Este debe tener las herramientas y drivers necesarios para la comunicación entre los equipos de campo (nivel dos) y las computadoras del nivel tres. Por lo general, en su forma básica existen dos paquetes: un programa de desarrollo y otro programa para la ejecución.

Un software SCADA en la mayoría son flexibles para los desarrolladores de aplicaciones; a través de lenguajes de programación estándar (C, C++, .NET, etc.), orientados a objetos; Soportan plataformas de sistemas operativos como Windows, Linux, Solaris; son escalables, flexibles, seguros, confiables y robustos; tienen funcionalidades gráficas potentes, herramientas de ingeniería y permiten gestionar base de datos, históricos, alarmas, tendencias, recetas y reportes.

A continuación se muestra un gráfico con la arquitectura general de un software SCADA:

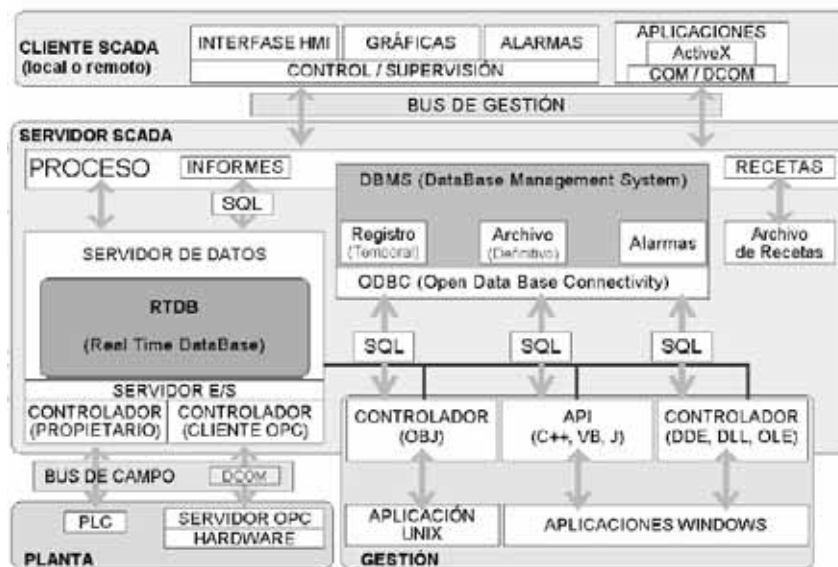


Figura 2-19. Arquitectura básica de software del sistema SCADA

Fuente: (Rodríguez, 2012, p. 41)

En el gráfico anterior se muestra la interacción entre las diversas herramientas, driver y aplicaciones entre el servidor SCADA, cliente SCADA, equipos de campo y sistemas de información de mayor nivel. Donde también, se identifica procesos bien definidos como: planta,

bus de campo, gestión, servidor SCADA, bus de gestión, cliente SCADA. Cada uno de ellos maneja cierta cantidad de datos e información.

#### **2.3.4. Red de comunicación industrial**

La transferencia de información entre los equipos de control del mismo nivel y entre los correspondientes a los niveles contiguos de la pirámide de la Figura 2-17, es mediante estándares de comunicación industrial. En términos generales se construyen en tres capas principales las cuales están sujetas al modelo OSI.

**Capa 1:** ámbito de las redes industriales: se emplean en el nivel más bajo de la pirámide del sistema SCADA para integrar los sensores y actuadores hacia los controladores autómatas, los buses de campos más usuales son Modbus RTU, PROFIBUS DP, DeviceNet, HART, Modbus TCP/IP, Profinet entre otros.

**Capa 2:** redes de control industrial: compuesto por controladores lógicos programables y ordenadores de control, los protocolos usuales son Ethernet, Profibus-FMS, Profinet, entre otros.

**Capa 3:** redes de información industriales: estas son las redes de más alto nivel, donde la recepción, procesamiento y análisis de los datos y las decisiones adoptadas que se transmiten a las capas inferiores. Esta capa es por lo general de enlace con bases de datos, que almacenan los resultados de rendimiento importantes del sistema, diferentes algoritmos de control y otros. Se implementa generalmente en la red Ethernet a través de servidores y clientes OPC.

#### **2.3.1. Comunicación OPC**

El OPC es un estándar de comunicación en el campo del control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece una interfaz común para comunicación, que permite que los componentes de software individuales interactúen y compartan los datos. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura cliente/servidor. El servidor

OPC es la fuente de datos (como un dispositivo hardware a nivel de planta) y cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a dicho servidor para leer/escribir cualquier variable que ofrezca el servidor. Es una solución abierta y flexible al clásico problema de los drivers propietarios. Prácticamente todos los fabricantes de sistemas de control, instrumentación y de procesos han incluido OPC en sus productos.

En pocas palabras este estándar industrial permite la intercomunicación entre dispositivos y controladores, a través de protocolos industriales, de casi todas las marcas, con el fin de monitoreo y control. Los servidores OPC contienen los drivers y/o protocolos de comunicación de la gran mayoría de controladores industriales. Los clientes OPC se pueden crear en una gran variedad de lenguajes de programación para realizar la lectura y/o escritura de datos hacia el Servidor y de ahí hacia los controladores industriales.

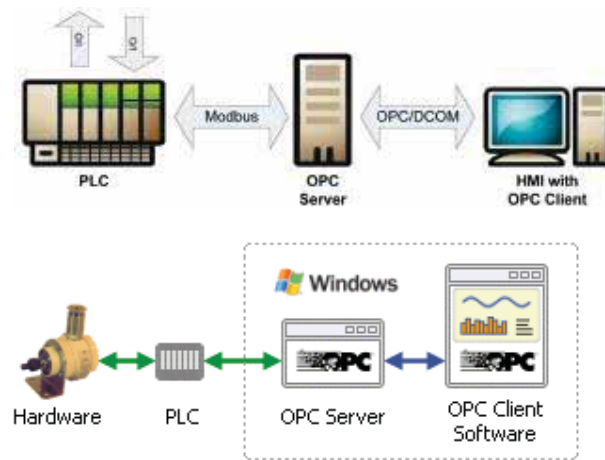


Figura 2-20. Ejemplos de arquitectura de OPC

Fuente: <http://pdacontroles.com/introduccion-servidores-opc/>

### 2.3.1. Interfaz hombre - máquina

La Interfaz Hombre Máquina (HMI) es la interfaz entre el proceso y los operadores, básicamente un panel del operador. Es la herramienta principal del SCADA, con la cual, los operadores y los supervisores de la planta coordinan y controlan los procesos generación en la planta.



Mostrar la información operativa en tiempo real es dominio de la HMI. Los gráficos del proceso visuales dan sentido y contexto al estado de todos los subsistemas de la unidad generadora, los parámetros eléctricos, parámetros hidráulicos, parámetros mecánicos, y otros parámetros del proceso. Las HMI proporcionan un conocimiento operacional del proceso y permiten el control mediante un interfaz visual gráfico de la planta.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

#### **3.1. Introducción**

El punto de partida para el desarrollo del sistema de control automático de nivel de agua, en la cámara de carga, fue la recolección de información de la planta hidroeléctrica; en esta actividad preparatoria se recaba la información de los equipos, datos técnicos, planos, manuales de operación de los equipos y se revisó las instrucciones de operación de la planta. Con esta información se plantea un esquema de solución para el problema, posteriormente, se describe los componentes principales del sistema de control automático y los requerimientos para la implementación y prueba del sistema. Cabe resaltar que las especificaciones del sistema desarrollado cumplen con los lineamientos de la empresa EGEMSA con respecto a la regulación de nivel de agua en la cámara de carga, en donde se establece esta operación con el generador de turbina Pelton.

El esquema de control planteado y aprobado por la empresa se muestra en la Figura 3-1 (con líneas rojas). En este capítulo, se presenta el diseño del controlador difuso y su interfaz de usuario. El controlador difuso determinará consignas de apertura de los inyectores de la turbina en función a la entrada, desviación de nivel de agua en la cámara de carga II. El comando de consigna de apertura será enviado al PLC principal del grupo, posteriormente, será retransmitido al sistema regulador de velocidad y carga de la turbina, a través del protocolo de comunicación Modbus.

El medio de comunicación seleccionado, para obtener la variable de entrada, es a través de la conexión OPC. De igual forma, el comando de apertura será escrito en el PLC del grupo Pelton por medio del mismo estándar de conexión; para ello, es necesario configurar los servidores OPCs mostrados en la siguiente figura.

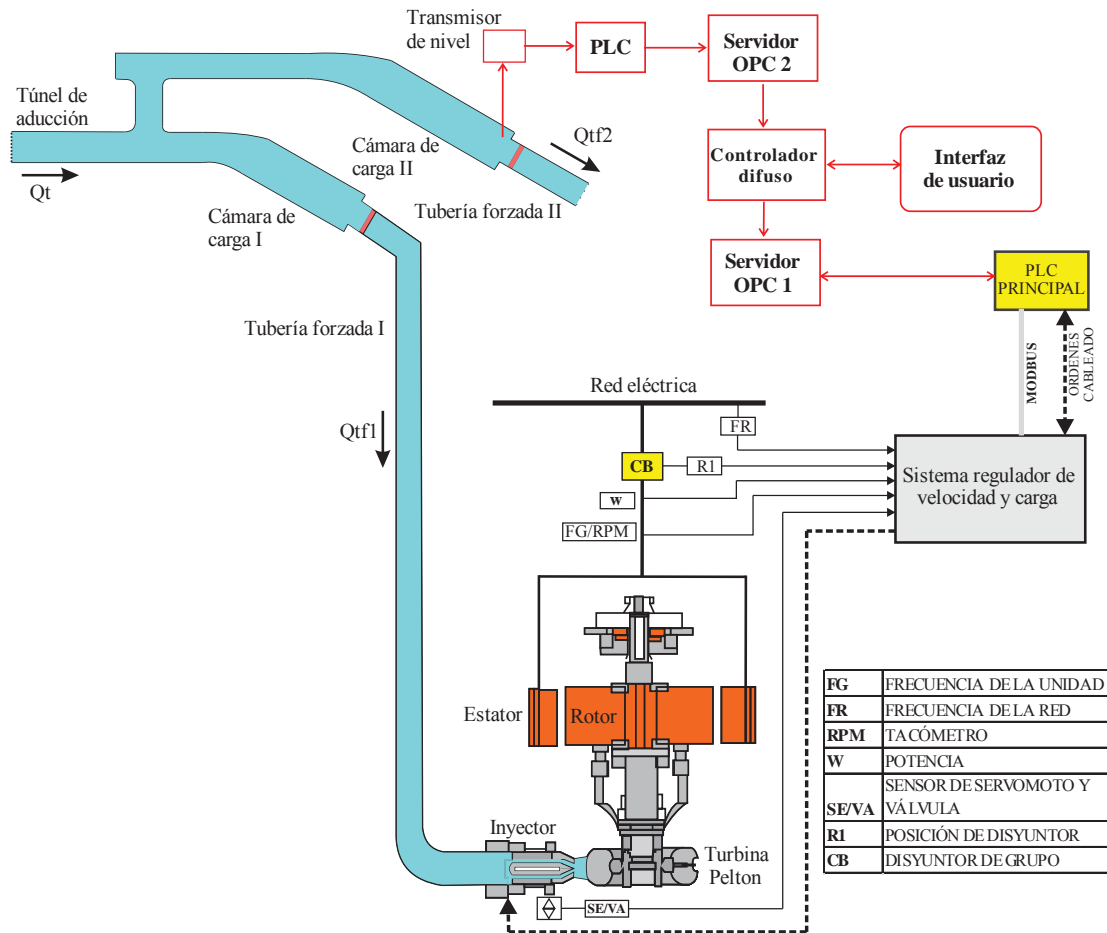


Figura 3-1. Esquema del sistema de control automático planteado

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Selección del grupo generador para la regulación de nivel de agua en la cámara de carga II

La central de Machupicchu tiene dos tipos de turbinas, tres grupos con turbina Pelton y un grupo Francis. El control de nivel de agua en la cámara de carga II se puede realizar variando la potencia de uno de los cuatro generadores, sin embargo, el grupo Francis al tener mayor eficiencia en la producción de energía, normalmente funciona con carga cercana al valor nominal. Para cargas menores al valor de diseño, el rendimiento tiende a disminuir; por tanto, no conviene variar la potencia de este grupo. Por otro lado, las turbinas Pelton tienen un rendimiento menor y su carga puede ser modificado hasta un 25 % sin perder la eficiencia. Por consiguiente, se selecciona un

grupo generador de turbina Pelton, para realizar las pruebas del diseño del sistema de control automático planteado en este proyecto. Las razones son las siguientes:

- El rendimiento de la turbina Pelton es menor que la turbina Francis, por tanto, conviene que este último funcione a plena carga para aprovechar al máximo el escaso recurso hídrico.
- La carga de una turbina Pelton puede ser modificado hasta un 25 % de su nominal, sin perder el rendimiento que se mantiene constante alrededor de 90 % en teoría.
- En la Central Hidroeléctrica de Machupichu, los grupos Pelton tienen un salto neto de columna de agua menor que el grupo Francis (al menos en 10 metros).

Los siguientes datos son tomados en cuenta para el diseño del sistema de control automatizada, los datos del generador tanto de turbina Pelton y turbina Francis, se adjunta en el Anexo D.

Especificaciones generales de la turbina Pelton:

- Potencia nominal 30.15 MW, aparente 33.5 MVA
- Potencia mínima 3.0 MW, máxima 29.55 MW
- Velocidad 450 RPM
- Caudal mínimo 1.0 m<sup>3</sup>/s, máximo 11.05 m<sup>3</sup>/s
- Rendimiento 2.860 MW/m<sup>3</sup>/s
- Columna de agua nominal: 350.00 m.

Especificaciones generales de la turbina Francis:

- Potencia nominal 101.35 MW, aparente 120.0 MVA
- Potencia mínima 40 MW, máxima 99.86 MW
- Velocidad 450 RPM
- Caudal mínimo 13.5 m<sup>3</sup>/s, máximo 31.0 m<sup>3</sup>/s.

- Rendimiento 3.135 MW/m<sup>3</sup>/s
- Nivel de agua en la cámara de carga: nivel rebose 2060.14, nivel máximo 2059.14, nivel mínimo 2058.14 m.s.n.m.
- Columna de agua nominal: 360.57 m.

### 3.3. Selección de software

Existen dos programas de desarrollo más usados que permiten el diseño y simulación de controladores difusos; además, incluyen el diseño de la interfaz de usuario. Estos programas, generalmente, se usan en entrenamientos académicos, los cuales son el LabVIEW y MATLAB. La siguiente tabla resume características y las herramientas que se requieren para la implementación del controlador difuso en este proyecto.

*Tabla 3-1. Características de software LabVIEW y MATLAB*

<b>Características</b>	<b>LabVIEW</b>	<b>MATLAB</b>
<b>Software</b>	LabVIEW 2013	MATLAB Standard
<b>Sistema operativo</b>	Microsoft Windows, Mac OS X, GNU/Linux	Microsoft Windows, Mac OS X, GNU/Linux
<b>Interfaz gráfico</b>	Incluye el LabVIEW 2013	Control System toolbox
<b>Paquete de lógica difusa</b>	LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit	Fuzzy Logic Toolbox
<b>Comunicación OPC</b>	LabVIEW Datalogging and Supervisory Control Module (DSC)	OPC Toolbox
<b>Lenguaje de programación</b>	Lenguaje G	C, Java, MATLAB

*Fuente: Elaboración propia*

MATLAB es un programa interactivo orientado a resolver problemas numéricos en base a matrices. En este software se realizan elevados cálculos complejos y las visualizaciones gráficas de los mismos. Además, dispone de un amplio abanico de programas especializados de apoyo, denominados Toolboxes; que podrían ser aplicados en cualquier proyecto de investigación para

obtener resultados más exactos.

En contraste, el programa LabVIEW tiene un enfoque de programación gráfica, que es bastante compatible para un programador que conoce la lógica cableada en los sistemas de automatización. Este software, principalmente, está orientado a la adquisición de datos y diseño de controladores. Cuenta con módulos complementarios como DSC, que facilita integrar hardware de medidas de cualquier fabricante. Incluye herramientas de desarrollo para registrar datos históricos en la red SCADA y diseño de interfaces de usuarios personalizados (HMI).

De lo anterior, para implementar el controlador difuso y la interfaz de usuario, en acuerdo con EGEMSA, se ha visto por conveniente seleccionar el software LabVIEW 2013 de NI. Este software de ingeniería está diseñado para aplicaciones que requieren pruebas de medidas y control; con acceso más rápido a la información de otras SCADAS. Así mismo, dispone de las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto.

### **3.4. Selección de hardware**

El control de producción de energía se realiza desde el centro de control de la planta. Una de las tareas que realizan los operarios, es la regulación de nivel de agua en la cámara de carga II; por tanto, la implementación del sistema de control difuso y su interfaz de usuario debe ser en una PC ubicado en el centro de control de la planta; para ello, es necesario disponer de un computador con recursos necesarios para la aplicación. Se seleccionó un computador con prestaciones de hardware necesario para instalar el programa LabVIEW versión 2013 con las siguientes características mínimas que requiere el software:

- Sistema operativo Windows XP SP3 (32-bit)
- Procesador Pentium 4/M o su equivalente
- Memoria RAM 1GB para el entorno de desarrollo
- Resolución de pantalla 1024 x 768 Pixels

- Espacio mínimo en disco duro 3.5GB
- Dos tarjetas de red

Según la Figura 3-1, el controlador se conecta por un lado con el servidor OPC, que corresponde al sistema SCADA de fase II, para obtener la medición de nivel de agua de la cámara de carga II; y por otro lado se conecta a la red de los PLCs de los grupos Pelton, para enviar las consignas de apertura con la finalidad de modificar la carga de la turbina Pelton. Las redes de control de fase I y II son redes Ethernet independientes con diferentes clases de IP; por ese motivo, se requiere una PC con dos tarjetas de red.

### **3.5. Descripción del modelo dinámico de la planta**

En esta sección, se describe el modelo dinámico de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu. Los elementos que definen el sistema hidráulico son: la cámara de carga, el túnel de aducción, canal de aliviadero o rebose, la tubería forzada, la turbina y pozo de oscilaciones (turbina Francis). La dinámica de cada componente se expresa por diferentes ecuaciones tal como se presenta en los siguientes ítems. Para describir el modelo de la planta se plantea el diagrama simplificado de la Figura 3-2, en donde se considera un solo grupo Pelton y la turbina Francis, considerando los demás grupos Pelton parados.

#### **3.5.1. Cámara de carga**

La cámara de carga es una pequeña presa con un canal de rebose (aliviadero) que permite la evacuación del exceso de flujo cuando la planta opera bajo condiciones de inundación. La superficie del agua en funcionamiento normal está por debajo del nivel del aliviadero (flujo de rebose cero). Un transmisor de nivel se coloca próximo al ingreso de la tubería forzada y su señal se envía al controlador difuso, que ajusta la potencia del generador, con el fin de mantener el nivel de agua constante en un punto de operación normal.

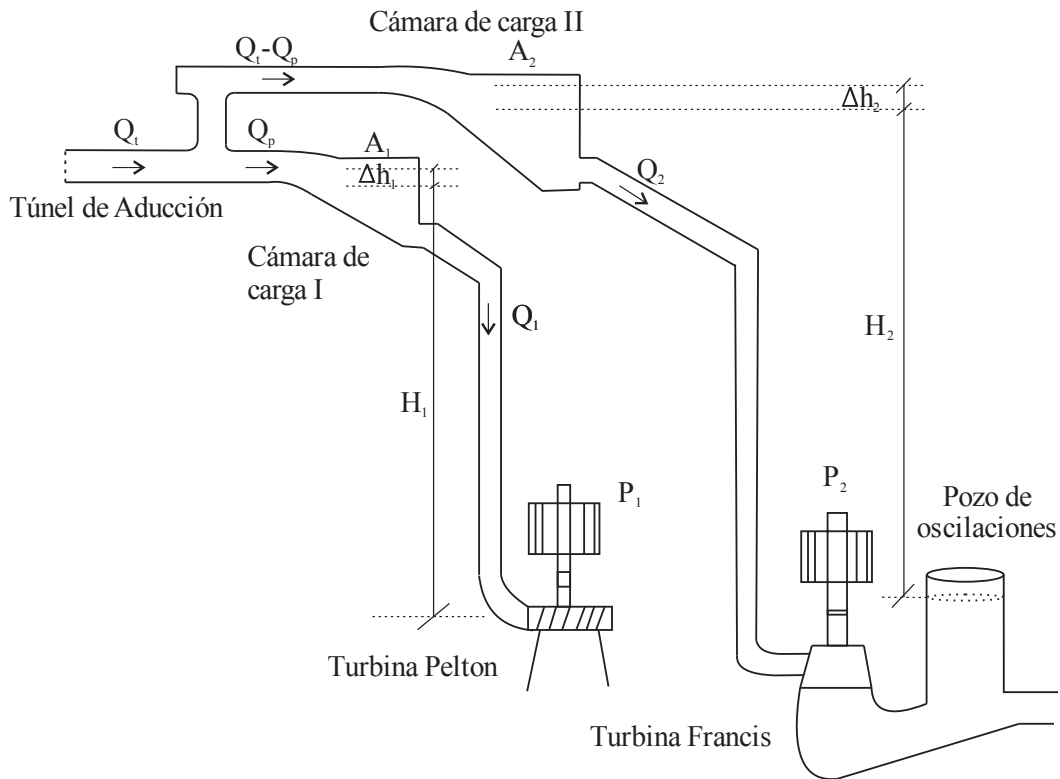


Figura 3-2. Esquema del circuito hidráulico de la planta.

Fuente: Elaboración propia

El diferencial de volumen de agua acumulado en la cámara de carga es igual al caudal de entrada menos la suma de caudales de salida. La ecuación general del sistema cámara de carga I y II es la siguiente:

$$A_1 * \frac{dh_1}{dt} = Q_p - Q_1 - Q_{w1} \tag{3-1}$$

$$A_2 * \frac{dh_2}{dt} = Q_t - Q_p - Q_2 - Q_{w2}$$

Donde:

$\Delta h_1$ : variación de nivel de agua en la cámara de carga I.

$\Delta h_2$ : variación de nivel de agua en la cámara de carga II.

$A_1$ : área superficial de cámara de carga I en m<sup>2</sup>.

$A_2$ : área superficial de cámara de carga II en m<sup>2</sup>.

$Q_t$ : caudal de túnel de aducción.



$Q_p$ : caudal de entrada a la cámara de carga I.

$Q_1$ : flujo de la tubería forzada de una turbina Pelton.

$Q_2$ : caudal de la tubería forzada del grupo Francis.

Para el caso de condiciones de operación normal con el nivel de agua por debajo del rebose, los caudales de aliviadero son ceros ( $Q_{w1} = Q_{w2} = 0$ ), La Ecuación 3-1, se reduce a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} A_1 * \frac{dh_1}{dt} &= Q_p - Q_1 \\ A_2 * \frac{dh_2}{dt} &= Q_t - Q_p - Q_2 \end{aligned} \quad (3-2)$$

Para determinar el modelo exacto se requiere los datos de cámara de carga I y II, Donde las áreas  $A_1$  y  $A_2$  no son constantes, el área superficial de agua en ambas cámaras de carga es irregular y depende de la variación del nivel de agua ( $\Delta h_1$  y  $\Delta h_2$ ). Es decir, a mayor diferencia de altura de agua, mayor será el área inundada en la cámara de carga. Esto se debe a la construcción del estanque de admisión de sección transversal variable y con una inclinación no uniforme (ver Anexo G).

### 3.5.2. Tubería forzada

Según los autores (Sarasúa et al, 2014, p. 4), la ecuación que rige el comportamiento de la tubería forzada que permite evaluar las pérdidas a lo largo del conducto es la siguiente, esta ecuación es no lineal porque el caudal de la tubería forzada ( $Q_1$ ) es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la columna de agua en dicha tubería ( $H_1$ ) (ver Ecuación 3-4).

$$\frac{L_1}{gA_1} \frac{dQ_1}{dt} + K_r |Q_1| Q_1 = h_1 \quad (3-3)$$

Dónde:

$L_1$ : longitud de la tubería forzada (m).

$A_1$ : sección transversal de la tubería forzada (m<sup>2</sup>).

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

$Q_1$ : caudal en la tubería forzada ( $m^3/s$ ).

$K_r$ : coeficiente de pérdida en la tubería forzada.

$h_1$ : pérdidas por fricción en la tubería forzada (mca).

La ecuación anterior, según los autores, no se considera en el análisis linealizado de la ecuación de cámara de la carga debido a que la constante de tiempo asociada es muy pequeña en comparación con la cámara de carga. Las pérdidas del flujo de agua por fricción en la tubería de carga también se pueden despreciar.

### 3.5.3. Turbina

Según el autor (Velasco, 2009, p. 369), en la práctica, el tamaño del inyector de la turbina Pelton se elige de tal modo que la velocidad de salida del chorro del agua ( $u$ ) sea independiente del área de la sección del inyector. Si existen  $n$  inyectores, cada uno de área  $s$ , el flujo total es:

$$Q_1 = uns$$

La velocidad de chorro se obtiene con la ecuación de Bernoulli entre los puntos de cámara de carga y la salida del inyector:

$$u = \sqrt{2gH_1}$$

Por tanto, el caudal total por una de las turbinas Pelton es:

$$Q_1 = S\sqrt{2gH_1}$$

$$Q_1 = XS_0\sqrt{2gH_1} \quad (3-4)$$

Donde:

$X = S/S_0$ : es el porcentaje de apertura del inyector.

$Q_1$ : flujo de agua en la turbina.

$S = ns$ : sección de apertura total de todos los inyectores.

$S_0$ : sección de apertura total de los inyectores abierto al 100 %.

$g$ : aceleración de gravedad.

### 3.5.4. Potencia eléctrica del generador

La energía mecánica que produce la turbina, sin considerar las pérdidas sería:

$$E_m = mgH_1$$

$$P_m = \frac{E_m}{t} = \frac{mgH_1}{t} = \rho g Q_1 H_1$$

La potencia producida por el generador es el equivalente a la potencia mecánica producida por la turbina Pelton multiplicado por la eficiencia de la transformación de energía:

$$P_e = \eta \rho g Q_1 H_1$$

Donde:

$\eta$ : eficiencia de la unidad generadora.

$\rho$ : densidad del agua (997Kg/m<sup>3</sup>).

En la práctica, se usa la siguiente ecuación aproximada para determinar la potencia producida por una unidad generadora:

$$P_e = 9.8 Q_1 H_1 \text{ (KW)} \quad (3-5)$$

### 3.5.5. Diagrama de bloques del modelo de la planta

Para representar el modelo completo de la planta, se representa cada componente hidráulico por bloques interconectados según las ecuaciones de cada componente (Ecuaciones 3-1, 3-3, 3-4 y 3-5). En el siguiente diagrama de bloques, se relaciona todos los componentes hidráulicos de La Central Hidroeléctrica de Machupicchu, desde la cámara de carga hasta el generador, muestra la relación de las variables que intervienen en el proceso de regulación de nivel de agua en la cámara de carga II. La regulación de nivel de agua de esta cámara es variando el porcentaje de apertura de los inyectores de la turbina Pelton (bloque controlador difuso), con lo cual, se modifica el flujo de

agua en la tubería forzada ( $Q_1$ ), esta variable de entrada al bloque de cámara de carga I modifica el flujo de entrada a la cámara de carga II ( $Q_i - Q_p$ ) y la variación del nivel de agua en esta cámara es la entrada al bloque del controlador difuso ( $\Delta h_2$ ).

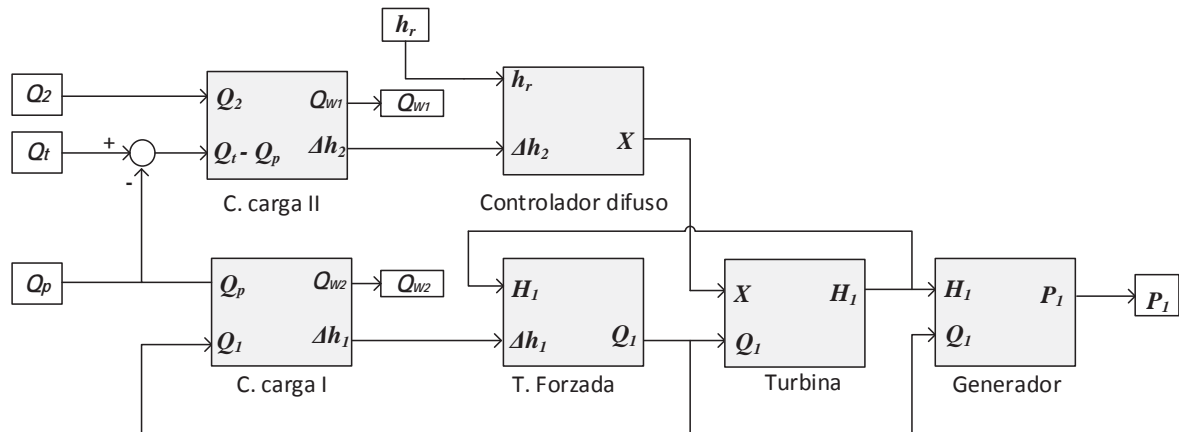


Figura 3-3. Diagrama de bloques del modelo de la planta simplificado.

Fuente: Elaboración propia

### 3.6. Medición de nivel de agua en la cámara de carga II

La medición del nivel de agua es a través de un transmisor de nivel ultrasónico (modelo SITRANS Probe LU de Siemens), cuya salida de 4-20mA es proporcional a la distancia en metros entre el transmisor y el nivel de agua. Esta señal se conecta hacia el módulo de entrada analógica (AI) del PLC del control de cámara de carga II, a la vez, este PLC está conectado a la red de servidores OPCs, a través de una red Ethernet doble anillo del sistema SCADA de fase II.

El sistema de medición del nivel de agua fue implementado en el proyecto de la construcción de del grupo Francis, en la que se integró esta variable al servidor OPC del sistema SCADA fase II con la finalidad de monitorearlo y registrarlo. Esta variable de nivel de agua se puede obtener por medio de conexión cliente OPC; para ello, el sistema de control difuso, planteado en este proyecto, se conectará al servidor por medio de red Ethernet. La siguiente figura muestra los componentes principales del sistema de medición de nivel de agua en la cámara de carga II.

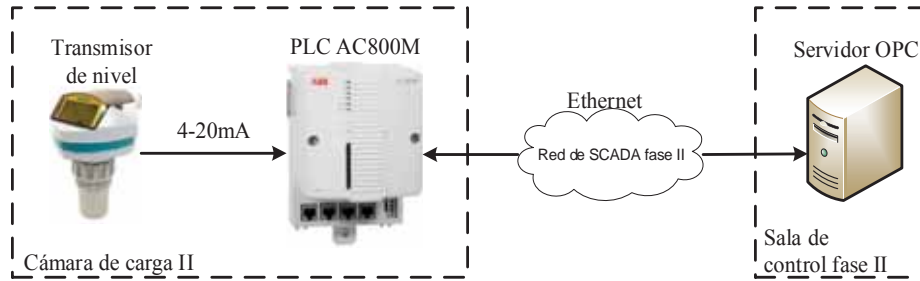


Figura 3-4. Sistema de medición de nivel de agua

Fuente: Elaboración propia

En el PLC modelo AC800M de ABB, se realiza el escalamiento correspondiente para obtener la distancia en metros que posteriormente es enlazado a uno de los tags del servidor OPC (M22HTC001LE0101\_XA30).

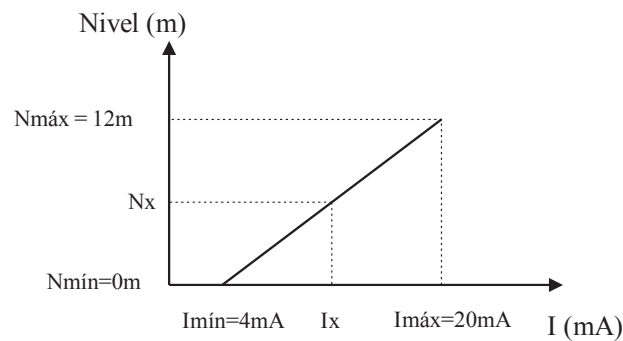


Figura 3-5. Escalamiento de señal de 4-20mA.

Fuente: Elaboración propia

La ecuación de la recta es la siguiente:

$$N_x - N_{mín} = \frac{N_{máx} - N_{mín}}{I_{máx} - I_{mín}} (I_x - I_{mín}) \quad (3-6)$$

$$N_x = \frac{3}{4} (I_x - 4) \quad (3-7)$$

Algunas de las características del transmisor de nivel de agua en la cámara de carga II son:

- Referencia del dispositivo: 7LM5221-0DA11
- Tecnología: Por ultrasonido



LabVIEW, para ser interpretado como una variación de nivel de agua en la cámara de carga II, se tiene que hacer un cambio de escala con referencia cero en el borde de rebose. Esta escala de medición es la que se utiliza, normalmente, en la regulación manual. La relación para cambiar de escala es la siguiente:

$$nivel = 2.30m - nivel\_sensor \quad (3-8)$$

El valor de *nivel\_sensor* es la medición de la distancia entre el transmisor y el nivel de agua que toma valores desde 0.25 m (Zona muerta del transmisor) hasta 7.30 m (distancia máxima cuando no hay agua en la cámara de carga II).

La variable *nivel*, calculado con la Ecuación 3-8, representa el valor de nivel de agua con referencia al borde de rebose; cuyo valor, normalmente, oscila entre -1.90 m (nivel mínimo alarma) y +0.20 m (cámara de carga rebosando). La relación de las variables *nivel* y *nivel\_sensor* se muestra, punto por punto, para algunos valores típicos en la operación normal de la planta, en la siguiente figura:

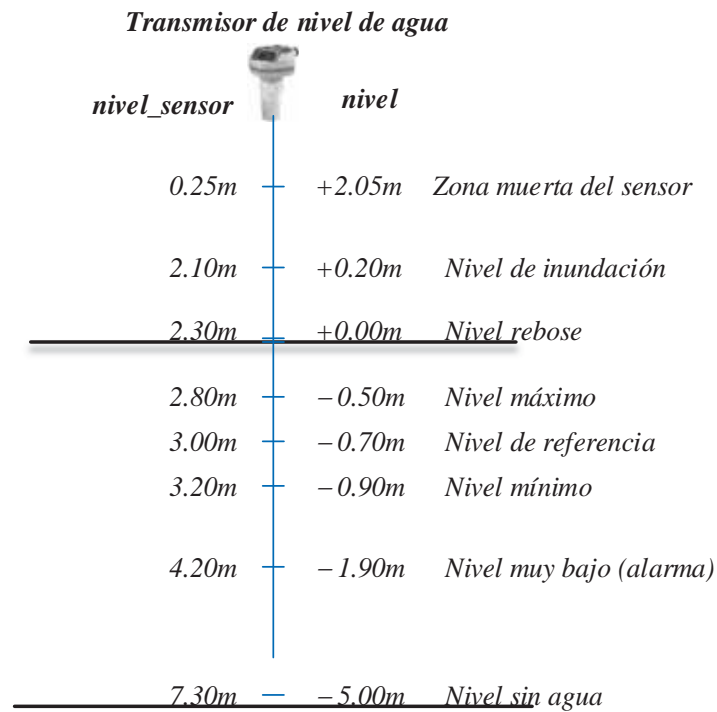


Figura 3-7. Escala de medición del nivel de agua en la cámara de carga II

Fuente: Elaboración propia

### 3.7. Desarrollo del algoritmo de control de nivel de agua en la cámara de carga II

El núcleo de este proyecto es el diseño del controlador difuso, cuyo algoritmo de control está basado en las técnicas de control que aplican los operarios durante la regulación manual de nivel de agua en la cámara de carga II. Los operarios encargados de esta tarea monitorean la desviación de nivel de agua con respecto a la referencia y la velocidad de cambio de esta variación; con lo cual, determinan el porcentaje de apertura de los inyectores, que ellos consideran apropiado modificar en el generador Pelton para mantener constante el nivel de agua en dicha cámara.

El gráfico de la Figura 3-8, es una muestra del registro de nivel de agua y apertura, durante la regulación manual, con una frecuencia de un dato por cada segundo. Esta información se obtiene con la finalidad de analizar la relación entre las variables nivel y apertura, como punto de partida para el diseño del controlador difuso. En el gráfico se puede identificar los puntos mínimos y máximos que alcanzaron estas variables durante las 14 horas de operación de la planta, en el mes de agosto del 2019, los datos fueron obtenidas durante el funcionamiento con un grupo Pelton y Francis, los demás grupos parados.

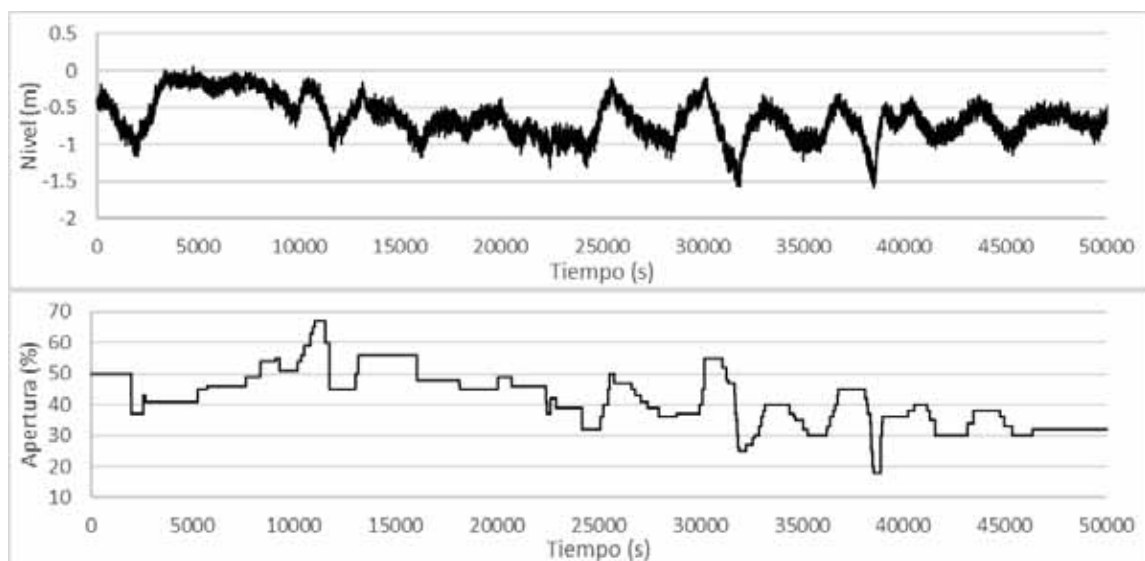


Figura 3-8. Tendencia de nivel y apertura durante la regulación manual de nivel de agua.

Fuente: Elaboración propia



En la figura anterior, se puede notar que en algunos valles de nivel se ha variado hasta  $-30\%$  de apertura cuando el nivel alcanzó hasta por debajo de  $-1.50$  m (tramo de 30000 s a 40000 s). Este gráfico demuestra que cuando la pendiente de nivel es rápida hacia abajo se requiere actuar con una variación de apertura considerable, hasta  $-30\%$  que equivale a disminuir la generación en 9 MW. Mientras que en los puntos más altos de nivel no se nota cambios bruscos de apertura; es decir, cuando la tendencia de nivel sube, el incremento de apertura es gradual (se incrementa con un paso de hasta  $1\%$ ). El porcentaje de apertura se mantiene constante en algunos tramos, sobre todo, para valores de niveles próximos al valor de referencia ( $-0.70$  m) donde los operarios evitan modificar la consigna de apertura. Durante este periodo de muestra, la variable nivel de agua no toma valores positivos (sin rebose), sin embargo, el nivel de agua alcanza valores muy bajos, por debajo de la franja aceptable (cámara de carga II:  $-0.50$  m a  $-0.90$  m).

Las reglas de control que los operarios usan no están especificadas en ningún manual de operación; sólo se tiene la consigna de niveles de agua aceptables en la cámara de carga I y II. El porcentaje de apertura que ellos determinan para modificar es predominantemente proporcional a la desviación de nivel de agua de la franja aceptable. Cuanto mayor es la desviación de nivel, mayor es la variación de apertura de los inyectores. Si la velocidad de cambio de la tendencia de nivel es pronunciada, la variación de apertura debe ser mucho más. En ocasiones, cuando las variaciones de nivel de agua llegan hasta  $-1.50$  a  $-1.90$  m, para estos casos críticos se llega a modificar hasta  $-30\%$  de apertura.

El algoritmo de control que los operarios encontraron por experiencia durante la regulación manual para encontrar el punto de equilibrio de nivel de agua se resume en el siguiente flujograma:

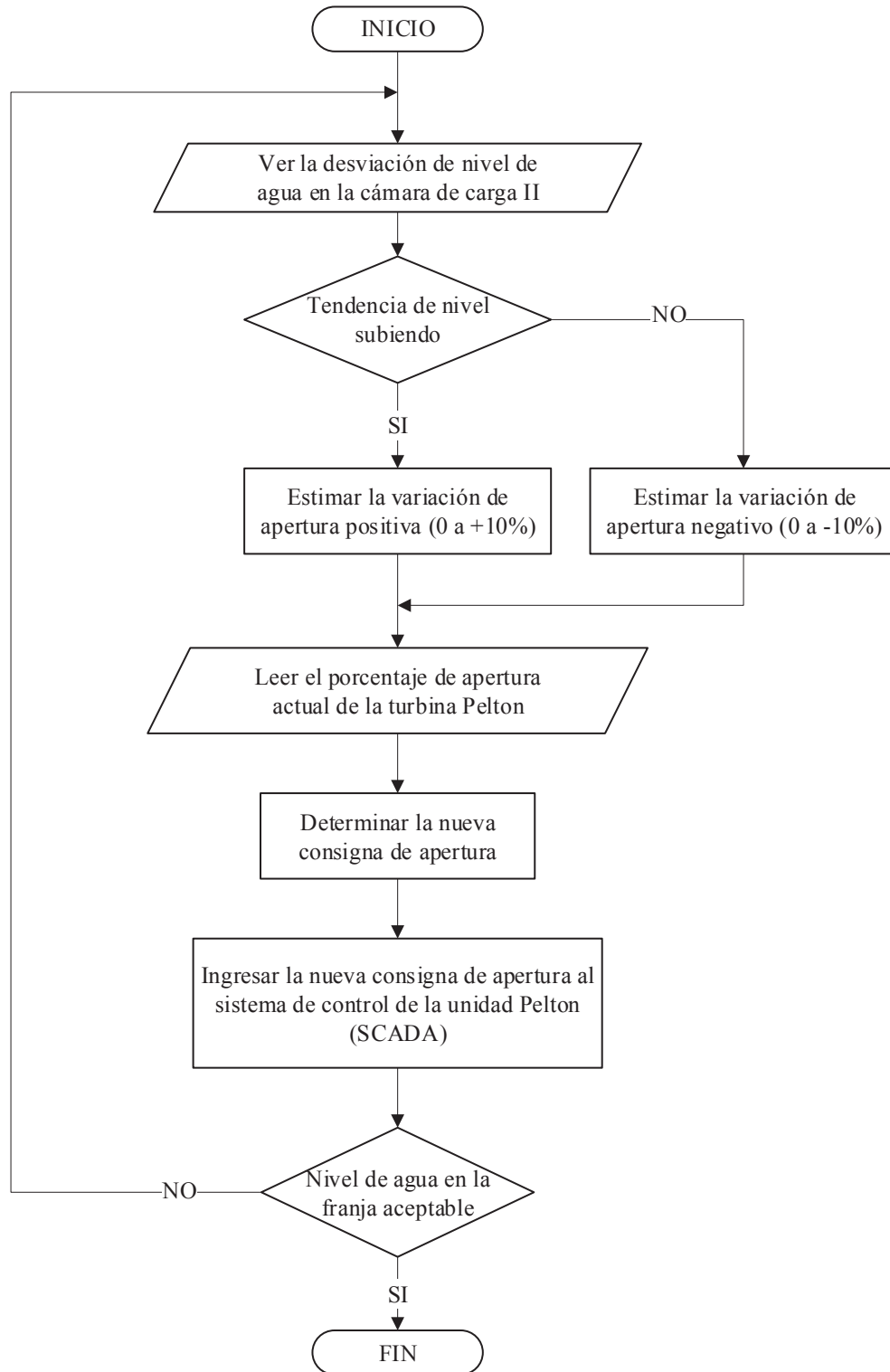


Figura 3-9. Algoritmo de control manual de nivel de agua en la cámara de carga II.

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de dispersión Figura 3-10, demuestra que no existe una relación lineal entre el nivel de

agua y la variación de apertura. Es decir, las consignas de apertura son determinados por criterio y experiencia de los operarios, sin embargo se nota mayor concentración de puntos en dos zonas (derecha e izquierda). Se ha trazado una línea roja para resaltar el punto de referencia de nivel. Al lado derecho de esta línea se tiene mayor concentración de puntos de apertura positiva; y al lado izquierdo, variaciones de apertura negativa. También se puede notar que las consignas de apertura para cada punto de nivel están ordenadas horizontalmente, esto es debido a que los operadores usan valores enteros (1, 2, 3, 4 y 5 % de apertura), que es lo común en control manual.

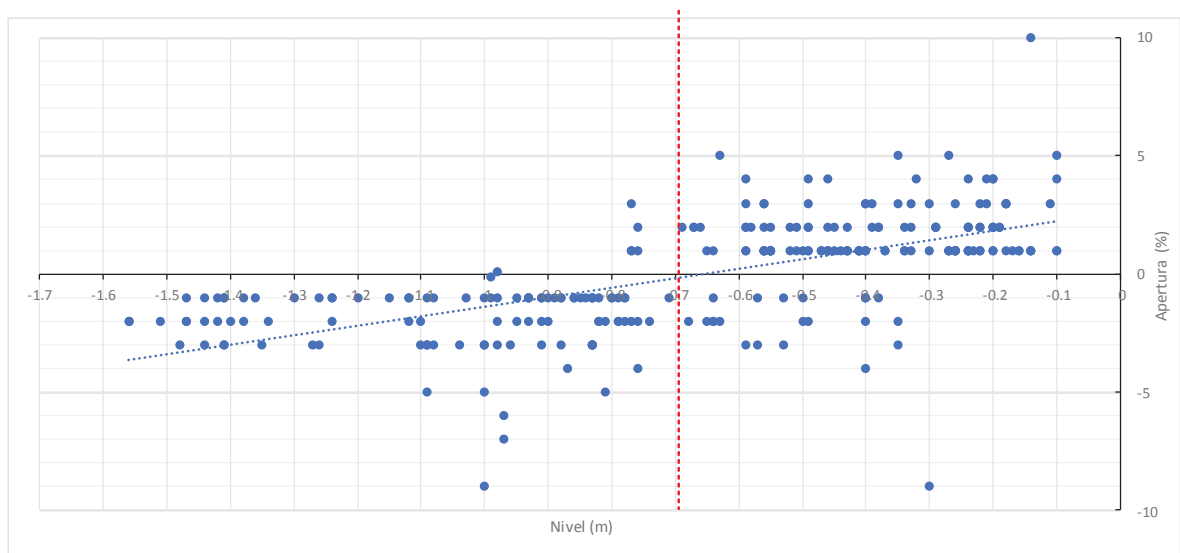
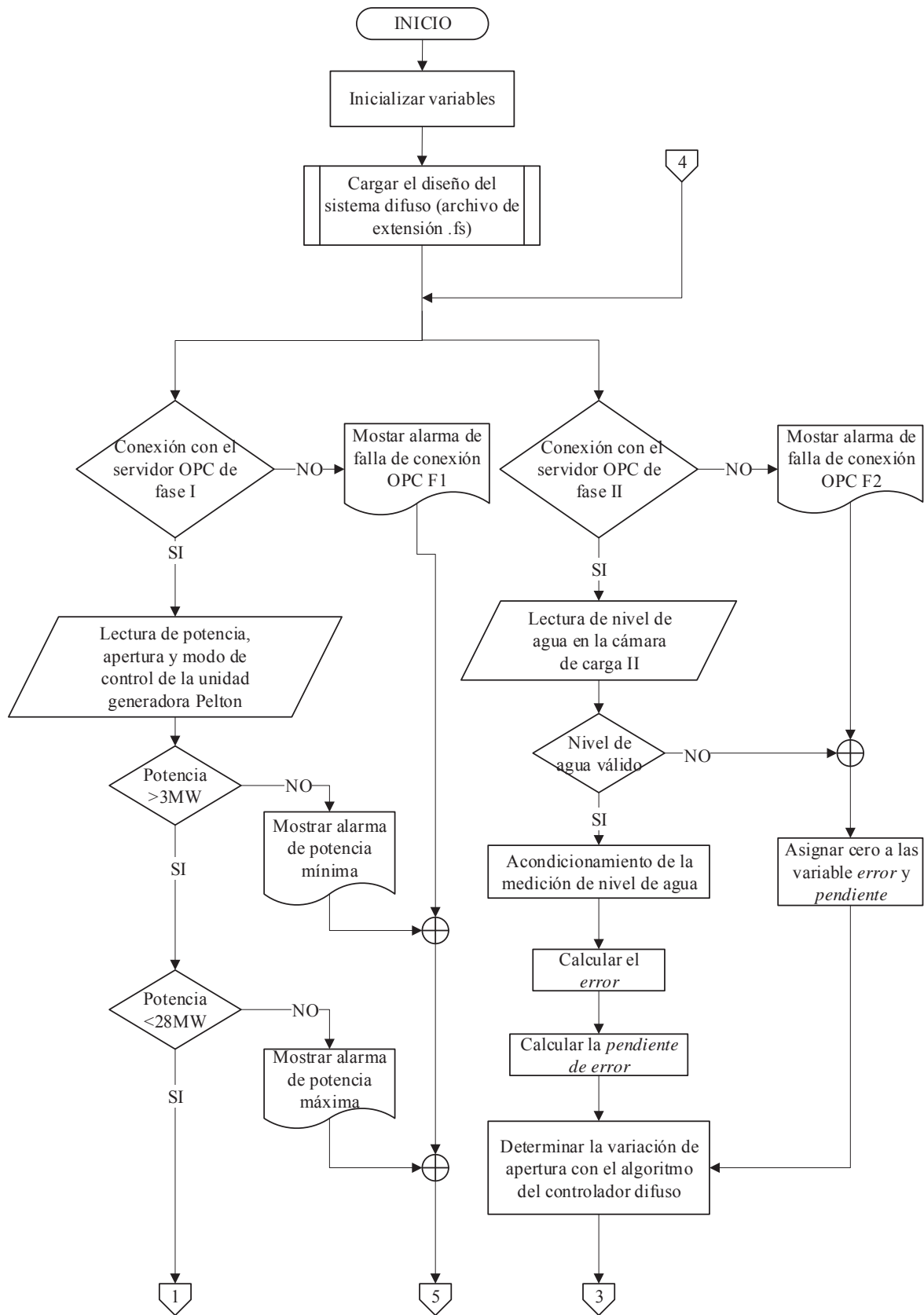


Figura 3-10. Gráfica de relación de nivel de agua vs variación de apertura.

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.1. Algoritmo de control de nivel de agua automático

El controlador difuso, diseñado en este proyecto, emula las funciones del operario en la regulación de nivel de agua en la cámara de carga II; para ello, toma como entrada la variación de nivel de agua y la velocidad de cambio de esta variación. La salida es la variación de consigna de apertura de los inyectores de la turbina Pelton. El siguiente algoritmo de control desarrollado, explica el orden de ejecución del programa, paso a paso, desde la inicialización de las variables hasta la escritura de consigna de apertura al sistema de control de turbina de un grupo generador.



Continua en la siguiente página

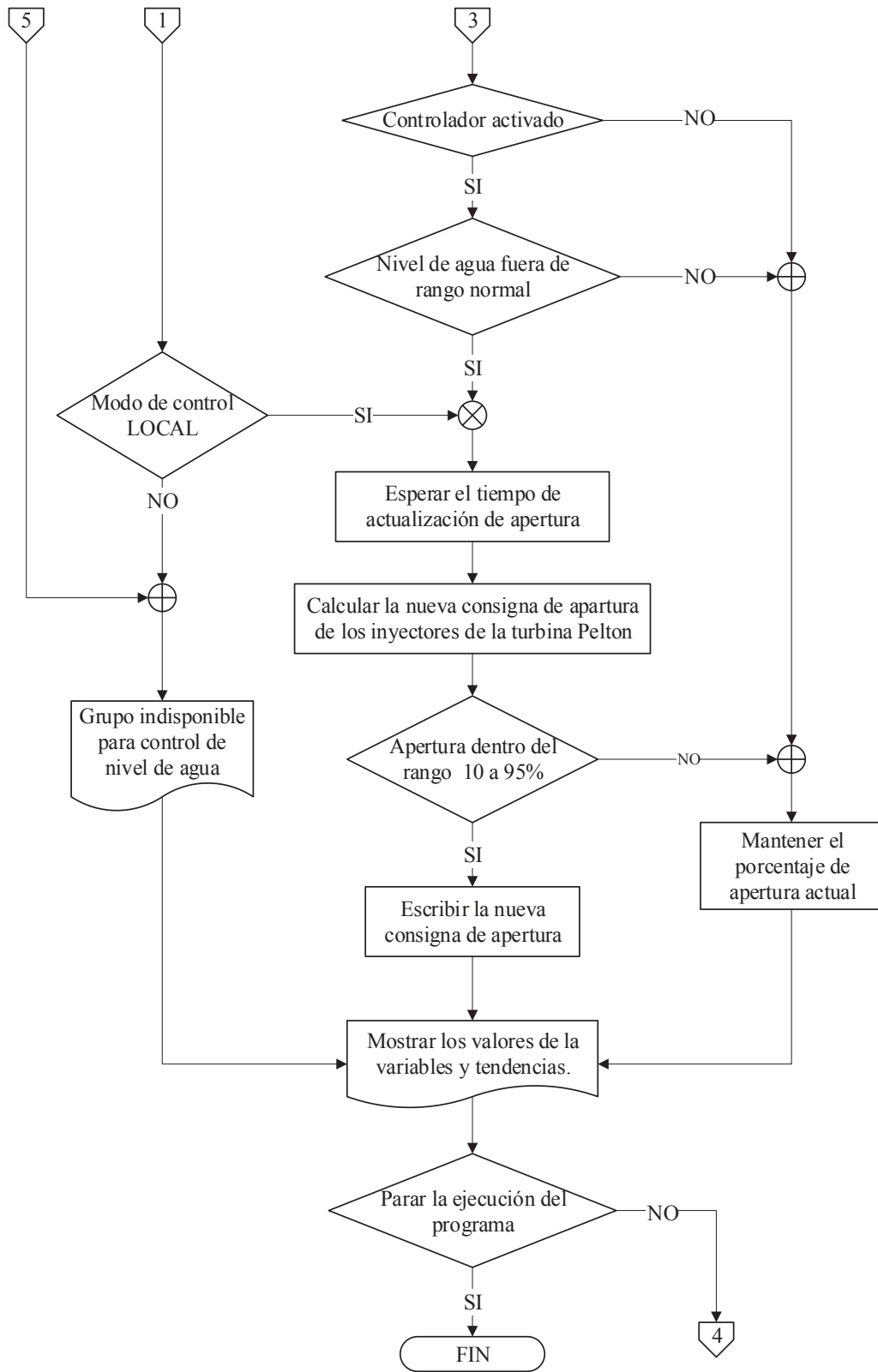


Figura 3-11. Algoritmo de funcionamiento del sistema de control automatizada.

Fuente: Elaboración propia

Para asegurar la lectura correcta de nivel de agua se debe seguir los siguientes pasos: al inicio se evalúa el valor de nivel de agua, posteriormente, se registra una cantidad adecuada de muestras determinar el error y pendiente de la tendencia de nivel de agua en el tiempo. Una vez determinado el error y pendiente de nivel de agua, se ejecuta el bloque de control difuso, donde se determina la salida en base a las reglas de control difuso diseñado. La salida es una variación de apertura de -6 % a +6 %, este valor se suma con la apertura actual y se envía al sistema de control de carga de la turbina Pelton.

Antes de escribir el comando de apertura se evalúa una serie de condiciones, falla de conexión OPC, los límites de potencia, el rango de apertura aceptable, grupo generador seleccionado para la regulación habilitada, lectura de nivel de agua sin error y sistema de control difuso activado.

En el manual de operación, el rango de potencia en la que puede operar un grupo Pelton es de 3 a 28 MW, que equivale de 10 % a 95 % en porcentajes de apertura de los inyectores. El riesgo de operar con potencias menores a 3 MW es que por la variación de frecuencia, el generador puede llegar a tomar cargas negativas activándose las protecciones de potencia inversa. Por otro lado se deja una ventana de 2 a 3.5 % por debajo de potencia nominal para cumplir con regulación primaria de frecuencia (RPF procedimiento 21 de COES). Para el diseño se consideró un 5 % menos.

### **3.8. Diseño del controlador difuso**

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques detallada del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II con un grupo generador Pelton. Los bloques de acondicionamiento de la medición de nivel de agua, cálculo de error y pendiente del error y lógica del controlador difuso se implementó en el programa LabVIEW. Las constantes  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_u$  son factores de escalamiento de entradas y salida. El controlador difuso es de tipo entrada múltiple y una salida (MISO).

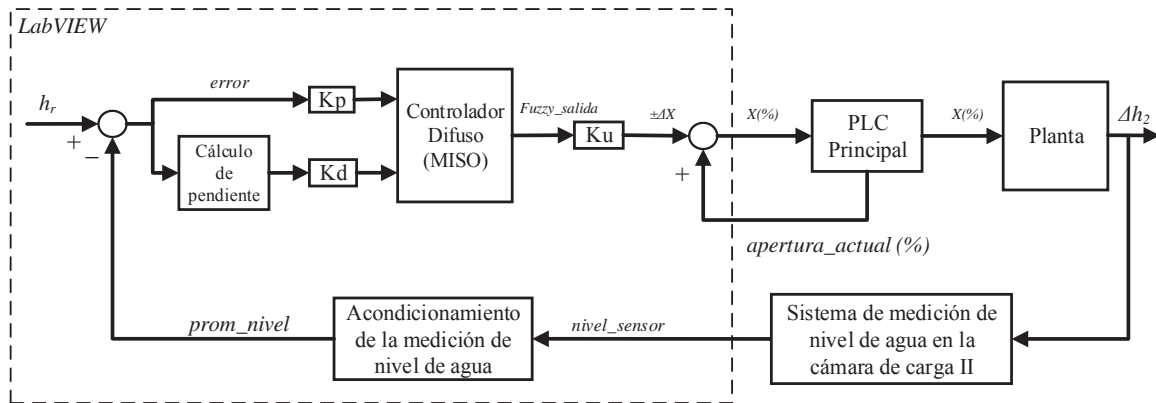


Figura 3-12. Diagrama de bloques del sistema de control difuso.

Fuente: Elaboración propia

El programa de desarrollo de aplicaciones de control LabVIEW cuenta con la herramienta diseñador del sistema difuso (*Toolkit Fuzzy System Designer*). Utilizando esta herramienta se procedió a fuzzificar las variables de entrada y salida, luego, en la pestaña “Rules” de la Figura 3-13 se definió las reglas de control y el método de defuzzificación. La pestaña “Test System” permite ensayar con algunos valores de entrada para verificar las salidas según las reglas definidas.

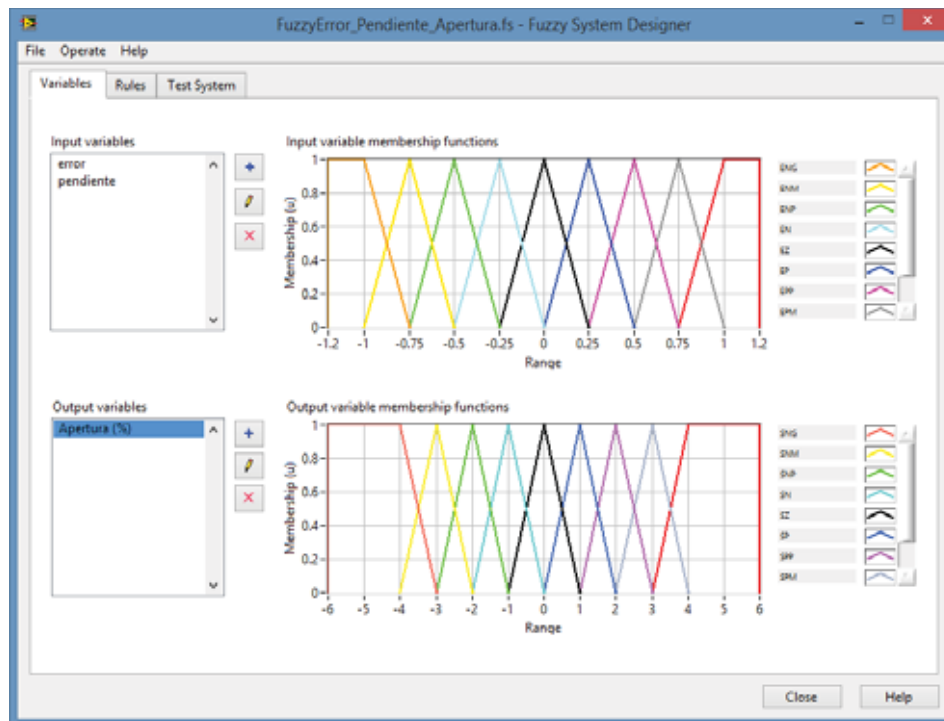


Figura 3-13. Interfaz de Fuzzy System Designer

### 3.8.1. Registro de datos de nivel de agua de la cámara de carga II

Para diseñar el sistema difuso, se ha analizado el registro de datos históricos de nivel de agua en la cámara de carga II (que data de todo el año 2017 obtenida durante la regulación manual), un registro amplio tomada cada media hora, con la finalidad de encontrar los valores típicos de nivel de agua. Con los valores obtenidos de este registro se procedió a realizar un análisis estadístico para determinar algunas características que sirvió de referencia en el diseño. En la Tabla 3-2 se hace un resumen de estas características (mínimo, máximo, promedio y moda). En la última columna, se ha calculado media aritmética de cada fila para tener un único valor promedio de cada parámetro de todo el año.

Tabla 3-2. Registro de valores típicos de nivel de agua de la cámara de carga II del año 2017.

Nivel	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Agt.	Sep.	Oct	Nov	Prom.
<b>Máx. (m)</b>	-0.28	+0.31	+0.41	+0.31	+0.31	+0.25	+0.35	+0.08	+0.28	+0.2	+0.3	+0.23m
<b>Prom. (m)</b>	-0.76	-0.82	-0.79	-0.76	-0.77	-0.74	-0.57	-0.69	-0.62	-0.67	-0.65	-0.71m
<b>Mín. (m)</b>	-1.42	-1.58	-2.3	-1.63	-1.56	-1.53	-1.99	-1.47	-1.53	-1.68	-1.59	-1.66m
<b>Moda (m)</b>	-0.76	-0.74	-0.9	-0.83	-0.77	-0.61	-0.2	-1.1	-0.68	-0.71	-0.65	-0.72m

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.8.2. Acondicionamiento de la medición de nivel de agua

La medición de nivel de agua presenta fluctuación en el tiempo, como se puede ver en la Figura 3-14; esto se debe a que el transmisor de nivel está instalado próximo a la entrada de la tubería forzada, donde el flujo de agua es turbulento, es decir, mientras más bajo es el nivel en la entrada se produce remolinos de agua. En la tendencia original de los valores de nivel de agua (tendencia de color azul, nivel (m)), existen picos de nivel por lo que no es fácil distinguir si la tendencia de nivel es de subida o de bajada. Estas oscilaciones en la medición de nivel llegan alcanzar hasta



0.50 m pico a pico.

Para aplicar esta variable como entrada al controlador difuso, es necesario realizar el acondicionamiento respectivo para obtener una tendencia suave; para lo cual, se ha seleccionado el método del promedio móvil, que consiste en utilizar las muestras consecutivas más recientes para pronosticar la tendencia de nivel de agua promedio. Cada promedio móvil es media aritmética de las  $n$  últimas muestras consecutivas; en consecuencia, la última muestra obtenida tendrá su correspondiente promedio móvil de las  $n$  muestras recientes. En el programa, este valor, se guarda en la variable *prom\_nivel* (promedio de nivel de agua).

La técnica de promedio móvil consiste en lo siguiente: supóngase que se tiene las  $n$  últimas muestras de la variable *nivel* ( $N_1, N_2, N_3 \dots N_n$ ); entonces, los valores de la variable *prom\_nivel* son:  $\frac{N_1+N_2+\dots+N_n}{n}$ ,  $\frac{N_2+N_3+\dots+N_{n+1}}{n}$ ,  $\frac{N_3+N_4+\dots+N_{n+2}}{n}$ , ... etc. Aplicando esta técnica, para una ventana de 8000 datos de nivel, se obtiene la siguiente gráfica, para valores de  $n$  igual a 30, 60, 120 y 180:

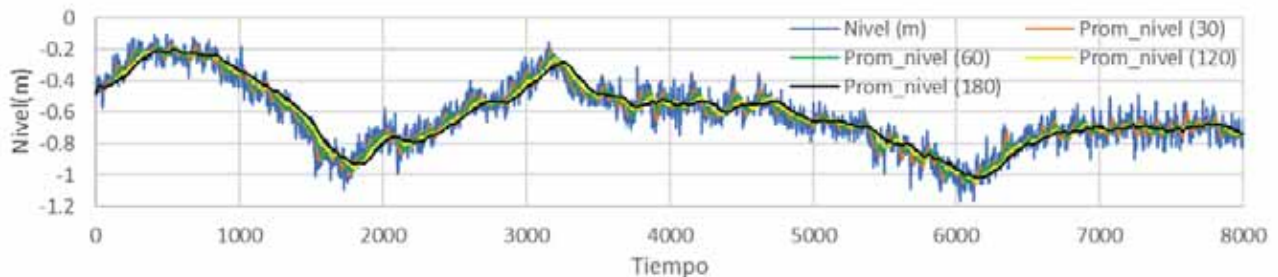


Figura 3-14. Tendencia suavizada obtenida con la técnica de promedio móvil.

Fuente: Elaboración propia

El número de elementos se selecciona de tal manera que las fluctuaciones de los valores sean eliminadas. Para el diseño resultó conveniente elegir  $n = 120$  muestras.

Viendo la gráfica anterior, a mayor cantidad de muestras mayor es el desfase entre la señal original y la señal de promedio móvil calculado. Para calcular el desfase de señal para diferentes valores  $n$ , se ha evaluado alrededor de tres puntos ( $P_1=1700$  s,  $P_2=3170$  s,  $P_3=6100$  s) en los que las tendencias tienen picos mínimos y máximos.

Tabla 3-3. Desfase entre la señal original y el promedio móvil calculado.

	<b>n=30</b>	<b>n=60</b>	<b>n=120</b>	<b>n=180</b>
<b>Desfase (P1)</b>	30 s	60 s	74 s	77 s
<b>Desfase (P2)</b>	12 s	38 s	38 s	95 s
<b>Desfase (P3)</b>	4 s	43 s	16 s	14 s
<b>Promedio</b>	<b>15 s</b>	<b>18 s</b>	<b>43 s</b>	<b>62 s</b>

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la atenuación en la amplitud de la señal de ruido se tomó una muestra en la que el nivel de agua se mantiene constante (tramo 7000 s a 7700 s de la Figura 3-14), en este tramo se encontró los valores mínimos y máximos, con lo cual se ha calculado amplitudes pico a pico para cada una de las tendencias de promedio como muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-4. Atenuación en la amplitud de la señal de ruido.

	<b>Nivel(m)</b>	<b>Promedio (n=30)</b>	<b>Promedio (n=60)</b>	<b>Promedio (n=120)</b>	<b>Promedio (n=180)</b>
<b>Mínimo</b>	-0.90 m	-0.77 m	-0.75 m	-0.73 m	-0.72 m
<b>Máximo</b>	-0.49 m	-0.60 m	-0.66 m	-0.67 m	-0.68 m
<b>Amplitud (p-p)</b>	0.41 m	0.17 m	0.09 m	0.06 m	0.04 m
<b>Atenuación (db)</b>	0	-7.90	-12.77	-17.00	-20.08

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.3. Evaluación y definición de funciones de pertenencia del error

Según la Tabla 3-2, el valor de la moda y promedio aritmético son aproximadamente iguales (moda = -0.72 m, promedio = -0.71 m); por consiguiente, se puede inferir que el nivel de agua en la cámara de carga se mantiene con mayor frecuencia alrededor de estos valores. Se toma este dato como valor de referencia redondeando a -0.70 m ( $h_r = -0.70 m$ ). Con lo cual, la relación para calcular el error es el siguiente:

$$error = prom\_nivel - h_r \quad (3-9)$$

El conjunto o el rango de valores de la variable error, se calcula con la ecuación anterior para los valores de nivel de agua máximo, promedio y mínimo de la Tabla 3-2 como sigue:

- Nivel máximo,  $nivel = +0.23$  m, entonces  $error = 0.23 - (-0.70) = +0.93 \approx +1.0$  m.
- Nivel promedio,  $nivel = -0.71$  m, entonces  $error = -0.71 - (-0.70) = 0.01 \approx 0.0$  m.
- Nivel mínimo,  $nivel = -1.66$  m, entonces  $error = -1.66 - (-0.70) = -0.96 \approx -1.0$  m.

A los valores precedentes se les agrega una holgura de  $\pm 0.20$  m para definir el universo de discurso de la variable *error*; con la finalidad de cubrir todos los valores que pueda tomar dicha variable:

$$E = [-1.2, 1.2]: \text{universo de discurso de la variable 'error'}$$

Los valores de desviación de nivel de agua (*error*), que pertenecen al universo de discurso, es una entrada válida que produce una salida real del controlador difuso. Fuera de este universo, son valores atípicos que produce una salida nula. El factor de escalamiento de entrada,  $Kp$ , modifica el rango del universo de discurso de la variable *error*. Para iniciar las pruebas este parámetro se fijó en  $Kp = 1$ . En la Tabla 3-5 se define las etiquetas de las funciones de pertenencia de la entrada *error*; cuyas formas seleccionadas son las triangulares y trapezoidales, funciones básicas y regulares, para no sobrecargar al procesador del computador.

Tabla 3-5. Definición de funciones de pertenencia del error.

Etiquetas	Descripción	Forma	Puntos
<b>ENG</b>	Error Negativo Grande	Trapezoidal	-1.2; -1.2; -1; -0.75
<b>ENM</b>	Error Negativo Mediano	Triangular	-1; -0.75; -0.5
<b>ENP</b>	Error Negativo Positivo	Triangular	-0.75; -0.5; -0.25
<b>EN</b>	Error Negativo	Triangular	-0.5; -0.25; 0
<b>EZ</b>	Error Cero	Triangular	-0.25; 0; 0.25
<b>EP</b>	Error Positivo	Triangular	0; 0.25; 0.5
<b>EPP</b>	Error Positivo Pequeño	Triangular	0.25; 0.5; 0.75
<b>EPM</b>	Error Positivo Mediano	Triangular	0.5; 0.75; 1
<b>EPG</b>	Error Positivo Grande	Trapezoidal	0.75; 1; 1.2; 1.2

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-15 se agregó dos funciones de pertenencia de saturación (ENG y EPG), que

corresponde a la holgura considerada anteriormente. La salida correspondiente para estos conjuntos difusos es una saturación en la salida del controlador difuso (una variación de apertura máxima hasta  $\pm 6\%$  de apertura).

Según el procedimiento del ingeniero Ebrahim Mamdani, las variables de entrada y salida deben tener un punto de equilibrio, por lo que se plantea funciones triangulares simétricos al eje Y. Es decir, cuando las entradas tomen el valor de cero la salida también será cero.

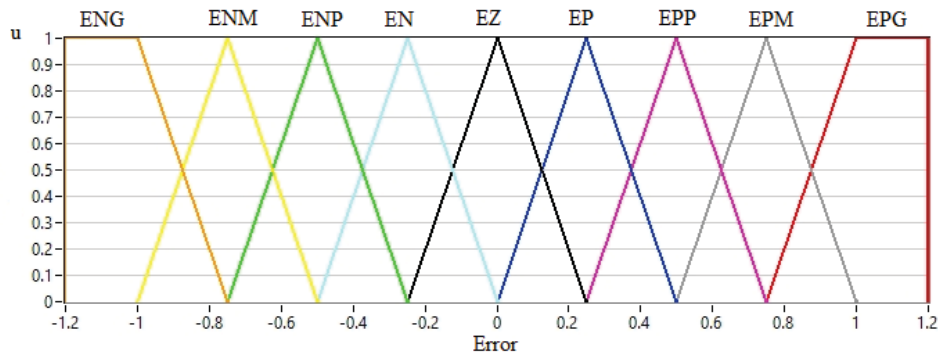


Figura 3-15. Representación gráfica de las funciones de pertenencia del error.

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.4. Evaluación y definición de funciones de pertenencia de la pendiente

La segunda entrada al controlador difuso es la tasa de cambio de nivel de agua (*pendiente*), que es lo mismo que la variación de error por unidad de tiempo. Para calcular el valor de la variable *pendiente*; se construye un arreglo de 180 elementos de error (Array\_y) y otro arreglo de los valores de tiempo en segundos (Array\_x). Con estos arreglos en el plano XY se calcula la pendiente de error con la siguiente ecuación de pendiente de regresión lineal:

$$pendiente = \frac{\sum_{i=0}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=0}^m (x_i - \bar{x})^2} \tag{3-10}$$

Fuente: [www.support.office.com](http://www.support.office.com) (demostrado en el Anexo C)

Donde el valor  $m$  es la cantidad de muestras de la variable *error*. La cantidad de muestras ( $m$ ) depende de la velocidad del cambio de nivel. Según la Figura 3-14, la variación de nivel de agua

en la cámara de carga es lento; por consiguiente, el mínimo valor de muestras que hace notable el valor de la pendiente de nivel es 180 elementos. Para valores de  $m$  menores a 180, el valor de la pendiente calculada no es notoria como para aplicar al controlador difuso. Después de varios ensayos se ha fijado en 180 muestras.

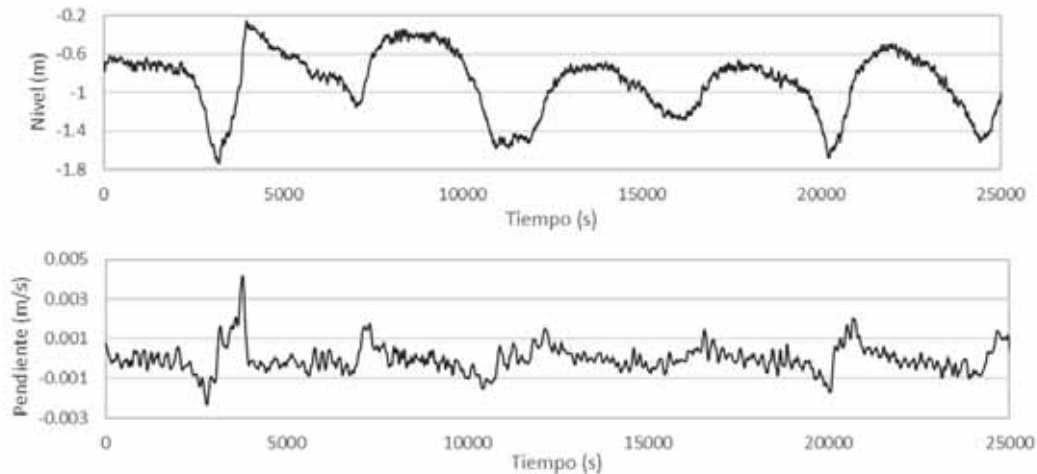


Figura 3-16. Tendencia de valores de la pendiente para una muestra de datos de nivel.

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura anterior, se observa que el valor de pendiente varía entre  $-0.002$  y  $+0.004$ ; siendo este último más alto para una variación notable que se muestra en el gráfico (en el punto 3800 s). Para los valores del nivel constante, la pendiente tiende a cero (tramo 0-2500 s); en cambio, el resto de la gráfica presenta picos notables, que es una consecuencia de variaciones pronunciadas de nivel de agua en la cámara de carga II. El factor de ganancia de la pendiente de error se ha fijado en  $K_d=100$ , debido a que los valores de pendiente calculados con 180 muestras son muy pequeños, fue necesario amplificar esta variable para tener un valor en el orden de  $-0.2$  a  $+0.2$ .

Para determinar el universo de discurso de la pendiente del nivel de agua, se analizó una muestra de datos típicos con notable variación (Figura 3-16, tendencia de nivel). Los valores de la pendiente fueron calculados con la técnica de regresión lineal (Ecuación 3-10); este gráfico es un ejemplo de los valores típicos de la pendiente de nivel de agua obtenido durante la operación manual. Según

la tendencia de pendiente de la Figura 3-16, se define el universo de discurso de la pendiente del error, con valores escalados, como sigue:

$$P = [-0.2, 0.2]: \text{universo de discurso de la pendiente de error}$$

Posteriormente, se definen las funciones de pertenencia; para lo cual, se ha considerado tres funciones básicas regulares para distinguir la velocidad de variación del error que el controlador difuso tomará en cuenta. En la siguiente tabla se define las etiquetas de funciones de pertenencia de la pendiente del error:

Tabla 3-6. Definición de funciones de pertenencia de la pendiente de error.

Etiqueta	Descripción	Forma	Puntos
<b>PN</b>	Pendiente Negativa	Trapezoidal	-0.2; -0.2; -0.1; -0.01
<b>PZ</b>	Pendiente Cero	Triangular	-0.04; 0; 0.04
<b>PP</b>	Pendiente Positiva	Trapezoidal	0.01; 0.1; 0.2; 0.2

Fuente: Elaboración propia

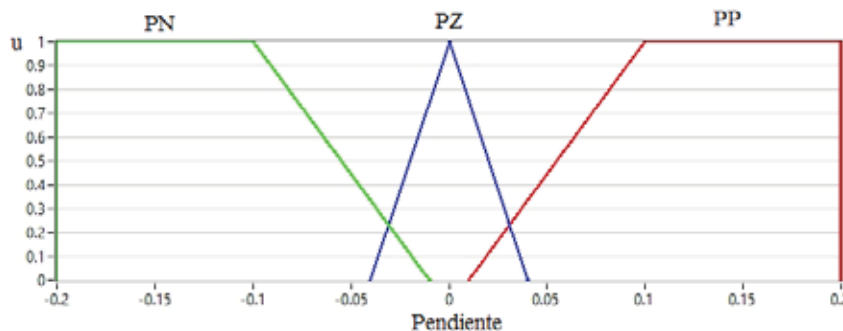


Figura 3-17. Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la pendiente de error.

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.5. Evaluación y definición de funciones de pertenencia de la salida

En las Figuras 3-8 y 3-9 se muestra un ejemplo de la variación de referencia de apertura del inyector de la turbina Pelton obtenida durante la regulación manual. Este gráfico, es una referencia para determinar los valores típicos que los operarios de la planta suelen modificar con la finalidad

de regular el nivel de agua en la cámara de carga II; por lo cual, estos datos son la base de conocimiento para el diseño del controlador difuso.

La salida del controlador difuso es la variación de apertura ( $\pm\Delta X$ ) para compensar la variación de nivel de agua en la cámara de carga II. Las variaciones más altas en la regulación manual han sido hasta 10 % (aumento pronunciado de nivel de agua) y hasta -30 % para casos en que el nivel de agua disminuyó por debajo de -1.50 m (tramo 3000 s a 35000 s de la Figura 3-8). Sin embargo, según la Figura 3-9, la mayor concentración de puntos de apertura se ubica de -5 % a +5 %; por tanto, se define el universo de discurso de salida limitado hasta  $\pm 6$  % de variación de apertura, con este rango de valores se estaría cubriendo toda la concentración de puntos de consigna de apertura de la Figura 3-9. Para alcanzar valores más grandes de apertura, el factor  $K_u$  se puede cambiar en el programa de 1 hasta 5, con lo cual se cubriría una variación de apertura hasta  $\pm 30$  %.

$$S = [-6 \%, +6 \%]: \text{universo de discurso de salida (Apertura en \%)}$$

En la siguiente tabla se define las etiquetas de funciones de pertenencia de la salida, en la cual, se ha definido funciones más concentradas al centro (0).

Tabla 3-7. Definición de funciones de pertenencia de la salida (Apertura).

<b>Etiquetas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Forma</b>	<b>Puntos</b>
<b>SNG</b>	Salida Negativo Grande	Trapezoidal	-6 ; -6 ; -4 ; -3
<b>SNM</b>	Salida Negativo Mediano	Triangular	-4 ; -3 ; -2
<b>SNP</b>	Salida Negativo Pequeño	Triangular	-3 ; -2 ; -1
<b>SN</b>	Salida Negativo	Triangular	-2 ; -1 ; 0
<b>SZ</b>	Salida Cero	Triangular	-1 ; 0 ; 1
<b>SP</b>	Salida Positivo	Triangular	0 ; 1 ; 2
<b>SPP</b>	Salida Positivo Pequeño	Triangular	1 ; 2 ; 3
<b>SPM</b>	Salida Positivo Mediano	Triangular	2 ; 3 ; 4
<b>SPG</b>	Salida Positivo Grande	Trapezoidal	3 ; 4 ; 6 ; 6

Fuente: Elaboración propia

El criterio para esta definición es que, a pequeñas variaciones de nivel de agua, el controlador difuso realizará cambios pequeños en la salida. Como se puede ver en la Figura 3-10 (gráfica de dispersión), los puntos de consigna están más concentrados en el rango de  $-4\%$  a  $+4\%$ . Al igual que las funciones de pertenencias de las entradas del controlador, se ha seleccionado funciones trapezoidales y triangulares para la salida como se muestra en la siguiente figura:

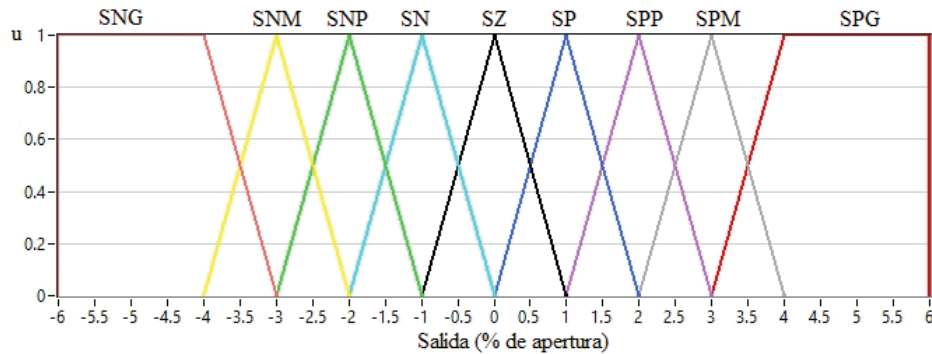


Figura 3-18. Representación gráfica de las funciones de pertenencia de la salida.

Fuente: Elaboración propia

### 3.8.6. Construcción de la matriz de asociación y declaración de reglas de inferencia difusa

Una vez seleccionado la forma y las etiquetas para las funciones de pertenencia de entrada y salida del controlador difuso; se procedió con el diseño de la Matriz de Asociación Difusa (FAM). Esta matriz es una tabla de doble entrada que relaciona las funciones de pertenencia de las entradas con las funciones de pertenencia de salida. Según esta matriz, se escribe las reglas de control difuso en la forma *si-entonces*. El proceso de sintonización consiste en buscar y construir la tabla FAM hasta obtener la mejor respuesta del controlador difuso.

Para construir esta matriz, se supone un ejemplo de evolución del error (como se muestra la Figura 3-19); este gráfico, simula una variación de nivel de agua en la cámara de carga para definir la salida para cada punto de entrada de *error* y *pendiente*. En este procedimiento se resume el conocimiento y las técnicas utilizadas para la regulación de nivel de agua en la cámara de carga



II; es decir, el operario conoce en qué punto bajar o subir la potencia y la magnitud de esta. Por ejemplo, el punto de inicio de la gráfica es EPG, que corresponde a una salida SPP; esto significa, que cuando el Error es Positivo Grande (EPG) y con una Pendiente Negativa (PN), el controlador le asigna una Salida Positiva Pequeña (SPP). En cambio, cuando la pendiente es cero para el mismo error (EPG) le asigna una Salida Positiva Grande (SPG).

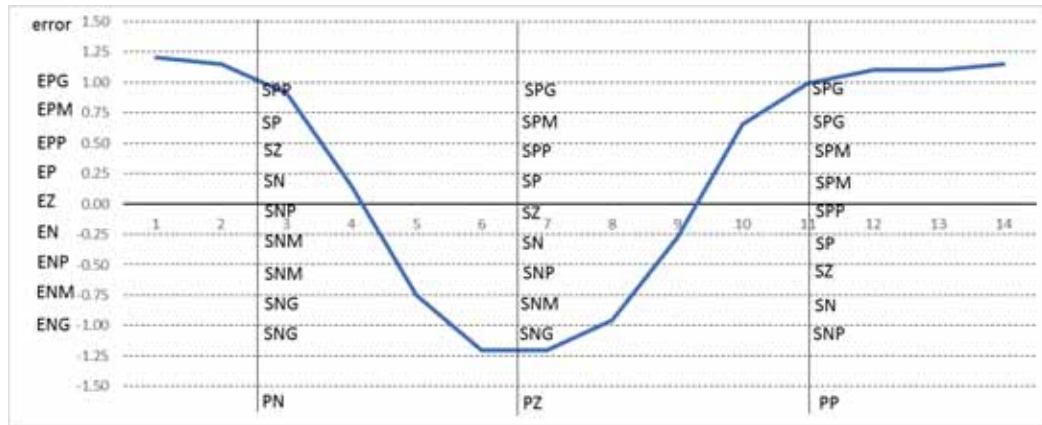


Figura 3-19. Simulación de respuesta del controlador difuso.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la figura anterior se genera la siguiente tabla (FAM).

Tabla 3-8. Matriz de Asociación Difusa (FAM).

		error								
		ENG	ENM	ENP	EN	EZ	EP	EPP	EPM	EPG
pendiente	PN	SNG	SNG	SNM	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP
	PZ	SNG	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPG
	PP	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPM	SPG	SPG

Fuente: Elaboración propia

La definición de las reglas es la descripción de la tabla FAM en una forma *si-entonces*, escrita en orden antecedente y consecuente. A continuación, se presenta una lista de las reglas de control del sistema difuso para la regulación automática de nivel de agua en la cámara de carga II con el grupo generador Pelton:

1. Si 'error' es negativo grande y 'pendiente' es negativo, entonces 'salida' es negativo grande.

2. Si '*error*' es negativo grande y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es negativo grande.
3. Si '*error*' es negativo grande y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es negativo pequeño.
4. Si '*error*' es negativo mediano y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo grande.
5. Si '*error*' es negativo mediano y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es negativo mediano.
6. Si '*error*' es negativo mediano y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es negativo.
7. Si '*error*' es negativo pequeño y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo mediano.
8. Si '*error*' es negativo pequeño y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es negativo pequeño.
9. Si '*error*' es negativo pequeño y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es cero.
10. Si '*error*' es negativo y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo mediano.
11. Si '*error*' es negativo y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es negativo pequeño.
12. Si '*error*' es negativo y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo.
13. Si '*error*' es cero y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo pequeño.
14. Si '*error*' es cero y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es cero.
15. Si '*error*' es cero y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo pequeño.
16. Si '*error*' es positivo y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo.
17. Si '*error*' es positivo y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es positivo.
18. Si '*error*' es positivo y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo mediano.
19. Si '*error*' es positivo y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es cero.
20. Si '*error*' es positivo pequeño y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es positivo pequeño.
21. Si '*error*' es positivo pequeño y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo mediano.
22. Si '*error*' es positivo mediano y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es positivo pequeño.
23. Si '*error*' es positivo mediano y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es positivo mediano.
24. Si '*error*' es positivo mediano y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo grande.
25. Si '*error*' es positivo grande y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es positivo mediano.
26. Si '*error*' es positivo grande y '*pendiente*' es cero, entonces '*salida*' es positivo grande.

27. Si '*error*' es positivo grande y '*pendiente*' es positivo, entonces '*salida*' es positivo grande.

### 3.8.7. Método de defuzzificación de salida

El método de defuzzificación seleccionado para el diseño, es la técnica del centro de área o gravedad. Este método se utiliza para obtener el valor real de la salida. Su metodología gráfica consiste en cortar la función de membresía de la salida al grado de la membresía respectiva de las entradas; es decir, segmenta las funciones de membresía de la salida, para cada entrada, generando dos áreas. El área inferior es la que se toma para hacer el cálculo. Se sobreponen todas estas áreas y se calcula el centroide de la superposición; el valor obtenido es la salida real del controlador difuso.

La interpretación gráfica de la explicación del párrafo anterior es la que se presenta en la Figura 3-20. Se supone que se tienen las siguientes entradas -0.60 y -0.075 de error y pendiente de error respectivamente. Se proyecta las rectas verticales, hasta cortar las funciones de pertenencia correspondiente para cada regla; desde este punto se proyecta las rectas horizontales, hasta cortar la recta vertical de implicación MINIMO. Con el método de implicación seleccionado se escoge el menor peso de cada regla, los cuales, cortan las funciones de pertenencia de salida respectiva para cada entrada.

Para los valores supuestos, las reglas implicadas son:

4. Si '*error*' es negativo mediano y '*pendiente*' es negativo entonces '*salida*' es negativo grande.
7. Si '*error*' es negativo pequeño y '*pendiente*' es negativo, entonces '*salida*' es negativo mediano.

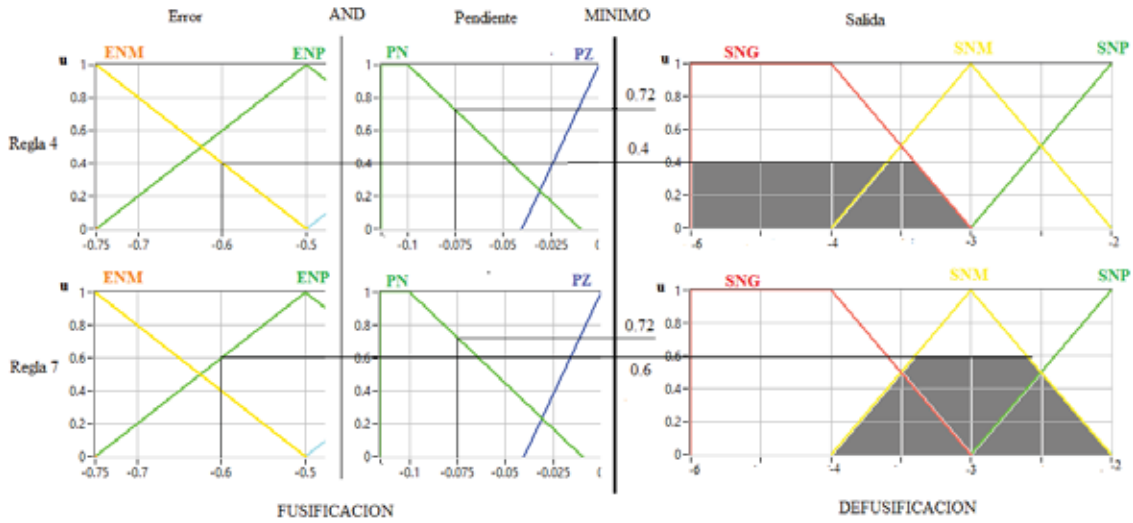


Figura 3-20. Interpretación gráfica del proceso de defuzzificación .

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida las funciones de pertenencias de salidas cortadas, se juntan estas áreas para determinar el valor centroide del área total aplicando la siguiente ecuación, en su forma continua; con lo cual, se obtiene la salida real del controlador difuso.

$$Salida = \frac{\int_{-6}^{-2} \mu(z) \cdot z dz}{\int_{-6}^{-2} \mu(z) dz} = -3.96771 \quad (3-11)$$

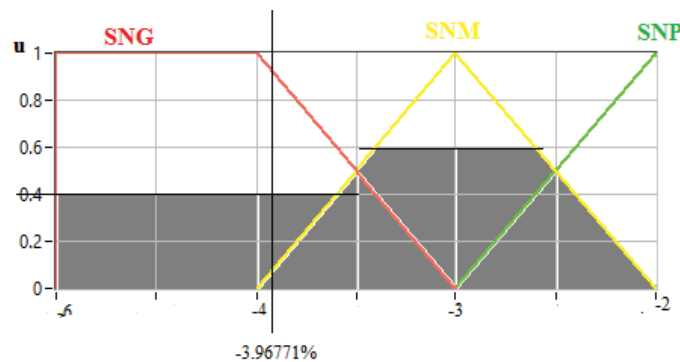


Figura 3-21. Áreas cortadas superpuestas de funciones de pertenencia de salida.

Fuente: Elaboración propia

Este valor será enviado al PLC principal del grupo Pelton, a través de conexión OPC. El signo negativo indica bajar la generación en  $-3.96771 \% * 30 \text{ MW} \approx -1.19 \text{ MW}$ .

Según la definición del universo de discurso de la salida del controlador difuso está dado entre  $-6$

% hasta +6 % de apertura, un valor intermedio de los valores vistos en la operación manual. El factor de escalamiento  $K_u$ , está pensado para modificar el alcance de rango del universo durante las pruebas. Por ejemplo, el valor obtenido en la Figura 3-21, si se quiere escribir los valores de salida como referencia de potencia; el factor  $K_u$  se fijaría en 0.30, con este factor su equivalente es  $-3.96771 \% * 0.3 = -1.19 \text{ MW}$ .

### 3.9. Implementación del sistema de control difuso

El servidor OPC es la fuente de datos del sistema SCADA de la fase II, en donde está integrado el dato de nivel de agua de cámara de carga II. Se implementó una conexión cliente OPC para obtener el valor de nivel de agua. El acceso a esta red del servidor es por intermedio de una PC, que hace la función de Gateway con dos tarjetas de red Ethernet seleccionado anteriormente. El controlador difuso se implementó en un computador de escritorio (PC) junto con el interfaz de usuario, en la sala de control unificado de fase I y fase II, donde coinciden ambas redes de control.

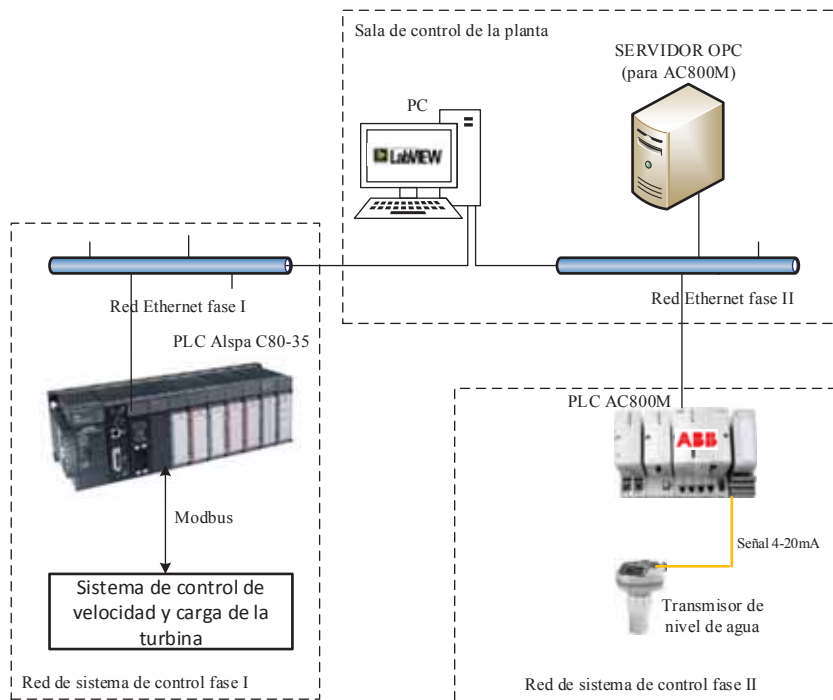


Figura 3-22. Arquitectura del hardware del sistema de control difuso.

Fuente: Elaboración propia

Se ha seleccionado el software de LabVIEW para implementar el interfaz de usuario, siendo necesario adicionar el módulo DSC al entorno de programación LabVIEW. Este módulo incluye herramientas para registrar datos históricos en tiempo real, administrar alarmas y eventos, conexión de equipos por cliente OPC en un sistema completo. El software seleccionado cuenta con la herramienta de diseño de la interfaz de usuario gráfico y de animación; que permitan el diseño de múltiples pantallas y visualización de tendencia de las variables del sistema.

### **3.9.1. Configuraciones básicas de la PC**

Una conexión OPC plantea una amenaza a la seguridad informática, debido a ello, es necesario configurar un cliente OPC de manera que pueda acceder a los datos del servidor OPC. Una forma de conexión segura es por autenticación del usuario, por ende, es necesario configurar con el mismo nombre de usuario y clave en el servidor y cliente OPC. El usuario debe tener permisos de administrador (La guía que sirvió de guía para realizar las configuraciones para una conexión OPC se adjunta en el Anexo E).

El estándar OPC usa la tecnología DCOM (Modelo de Objetos de Componentes Distribuidos), que es una tecnología propia de Microsoft, para intercambiar la información entre aplicaciones instalados en diferentes computadoras, a través de la red Ethernet. El usuario creado como administrador debe tener permisos para el uso de la tecnología DCOM. La forma más sencilla para autenticar la conexión OPC es tener una cuenta de usuario con privilegios DCOM de inicio sesión para el sistema operativo Windows en el servidor y en el lado del cliente.

El estándar de comunicación por OPC no soporta Firewall del sistema operativo, por lo tanto, se tuvo que deshabilitar. Así mismo, se tienen que desinstalar los antivirus porque bloquean los puertos de conexión OPC. Por último, se ha configurado la dirección de la PC cliente con la misma clase de IP del servidor OPC de fase II.

Una vez configurado y dado el permiso al usuario creado para la conexión, se procedió con la

prueba de conexión, a través del interfaz *command prompt* con la instrucción *net view*. Con lo cual, se comprueba la conexión y acceso a los servidores de red SCADA de la fase II.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows XP [Version 5.1.26001]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\abbpgp>net view

Server Name                Remark
-----
\\HIST
\\LCU04
\\LCUAUX
\\LCUDAM
\\SERVERA                  PGP SERVER A
\\SERVERB                  PGP SERVER A
\\SYSMAC
\\TESTUPC
\\WS01                     ENGINEERING WS01
\\WS02
\\WS03
\\WS04
The command completed successfully.

```

Figura 3-23. Prueba de conexión con la red de SCADA de la fase II.

Fuente: Elaboración propia

### 3.9.2. Configuración de una conexión cliente OPC

En este proyecto se eligió el estándar de comunicación OPC, porque ya se tenía implementado e integrado los equipos involucrados del proyecto en una red de control Ethernet. A través del estándar mencionado, es mucho más fácil acceder a los datos de los PLCs sin modificar la arquitectura de hardware y software de los controladores. Otro de los motivos, es que los equipos y dispositivos involucrados en el proyecto están ubicadas en distintos puntos distantes de la planta; por esta razón, se usó la infraestructura de red Ethernet existente para la interconexión e implementación del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II. Implementar con equipos nuevos o adicionar a los ya existentes, demandaría implementar cableados y enlaces de fibra óptica, y los costos de implementación serían mayores.

El siguiente diagrama de flujo, simplifica la conexión de los equipos, desde el sensor hasta el controlador difuso y posteriormente la conexión con los PLCs de los grupos Pelton.

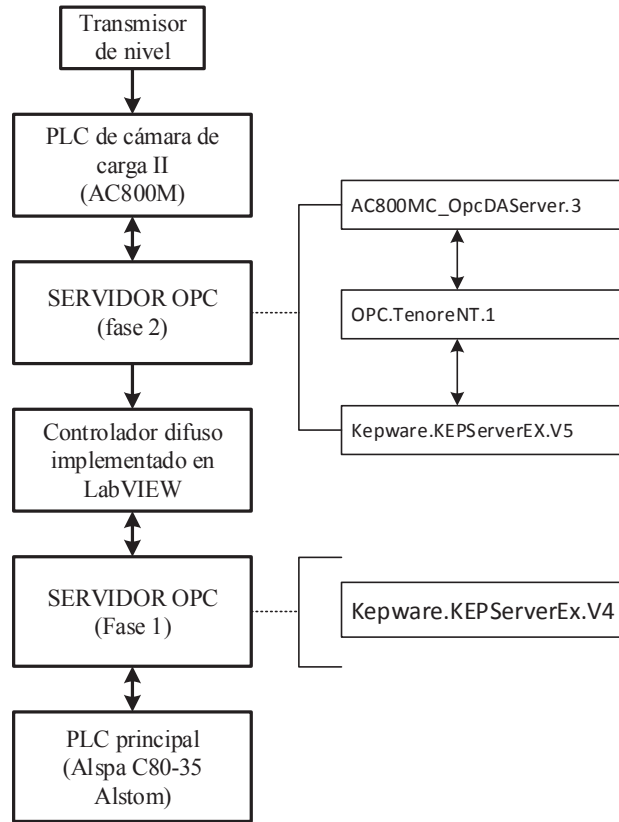


Figura 3-24. Flujograma de conexión OPC.

Fuente: Elaboración propia

Antes de iniciar el desarrollo de la lógica principal del sistema de control difuso, fue necesario configurar los canales de conexión; por el cual, la aplicación creada en el programa LabVIEW pueda obtener datos del sistema de medición de nivel de agua, y por el otro canal intercambiar datos con el PLC del grupo Pelton. Una vez instalado el software LabVIEW 2013 en la PC, se procedió con las primeras pruebas de conexión cliente OPC, para ello se crea un proyecto de aplicación en LabVIEW (Proj: DiseñoControlDifuso); dentro de este proyecto se crea dos librerías de conexión cliente OPC, una para obtener la medición de nivel de agua y el otro para leer y escribir los comandos de consigna de apertura al sistema de control de carga de la turbina Pelton. El servidor OPC es un paquete de software en el que se configura seleccionando el protocolo nativo de los PLCs para leer y escribir todas las marcas y registros utilizadas en la programación de este. En el servidor OPC del sistema SCADA fase II se están ejecutando tres paquetes de servidores



interconectados entre sí como se ve en el flujograma de la Figura 3-24. El sentido de las flechas indica flujo de datos entre los servidores (lectura/escritura), la función de cada paquete de software son los siguientes:

1. ABB.AC800MC\_OpcDAServer.3, servidor OPC para coleccionar todos los datos de los PLCs AC800M de ABB.
2. OPC.TenoreNT.1, servidor principal del software PGP (Software de SACADA fase II)
3. Kepware.KEPServerEX.V5, como servidor de datos para redes externas, por ejemplo, envió de datos al COES y otras redes de la planta.

Para configurar una conexión cliente OPC en LabVIEW, se tiene que hacer uso del I/O server (del inglés In/Out) del módulo DSC. En la configuración de este servidor se direcciona al servidor OPC de donde se quiere obtener los datos, en este caso al Kepware.KEPServerEX.V5, que contiene el tag de nivel de agua en la cámara de carga II. El esquema de conexión detallado para este propósito es la que se muestra en la Figura 3-25. El PLC y servidor OPC forman parte del sistema de medición de nivel de agua en la cámara de carga II, al que se conecta la aplicación LabVIEW por medio del servidor E/S que funciona como un puente entre las variables compartidas de la aplicación LabVIEW (*nivel\_sensor*) y las etiquetas de datos en el servidor OPC (M22HTC001LE0101\_XA30).

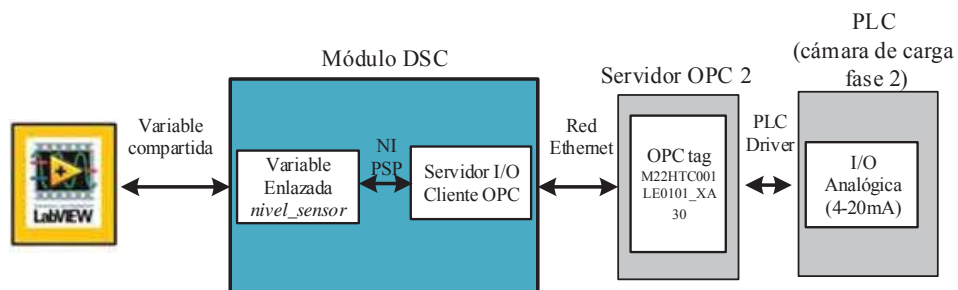


Figura 3-25. Conexión cliente y servidor OPC para el PLC AC800M de ABB.

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar la lectura de dato de nivel de agua en la cámara de carga II se utilizó la herramienta Administrador del Sistema Distribuido de NI; el cual, se ejecuta seleccionando desde el menú *Tools>>Distributed System Manager*. Esta opción muestra la ventana de la Figura 3-26, en la que se puede ver el valor en línea, leído por el cliente OPC LabVIEW en la opción *Current Value* (2.68949m de nivel de agua). Este valor en el diseño de controlador difuso se enlaza con la variable *nivel\_sensor*, variable utilizada en el diagrama de bloques de LabVIEW.

En la siguiente figura, la opción *New Value* no permite forzar o ingresar un valor, ya que, es solo de lectura del servidor OPC. Además, se muestra una gráfica de lectura en la opción *Show Trend*, en ella se muestra la evolución de la medición de nivel de agua en tiempo real. En caso de existir alguna falla en la conexión, en la tendencia se mostraría una línea horizontal; así mismo, el parámetro *Quality* se pone *bad* y se muestra una alarma de falla de conexión OPC en el interfaz de usuario de la Figura 3-30.

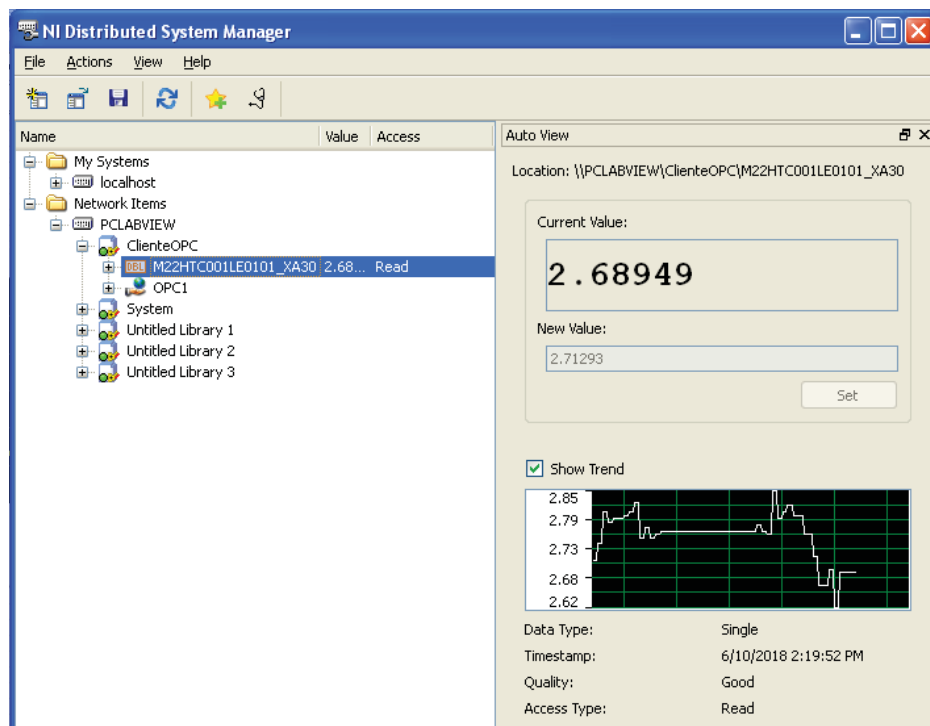


Figura 3-26. Prueba de lectura de nivel de agua de la cámara II.

Fuente: captura de pantalla administracion de sistema distribuido de LabVIEW

Para la conexión entre el controlador difuso y el PLC principal del grupo Pelton, se ha implementado un servidor OPC (fase I), cuyo identificador de programa es Kepware.KEPServerExV4, una versión antigua compatible con el driver del PLC Alspa C80-35 (GE Ethernet). En la configuración básica de este servidor se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Nombre del dispositivo: GTA01M, 01M hace referencia al grupo Pelton G1.
- Modelo: 9030-350, modelo compatible con el modelo real C80-35, este último es un modelo discontinuado su driver no viene en los paquetes de los servidores OPC actuales, por eso se tuvo que buscar driver alternativo de otro modelo compatible.
- Dirección IP o ID: 195.9.207.1
- Velocidad de escaneo (scan rate): 1000 ms
- Puerto de comunicación TCP/IP: 18245

Una vez configurado el servidor OPC para poder leer y escribir las marcas y registros del PLC Alspa C80-35, en LabVIEW se crea otro canal de conexión cliente OPC enlazado con este servidor OPC de fase I. El esquema detallado es el siguiente:

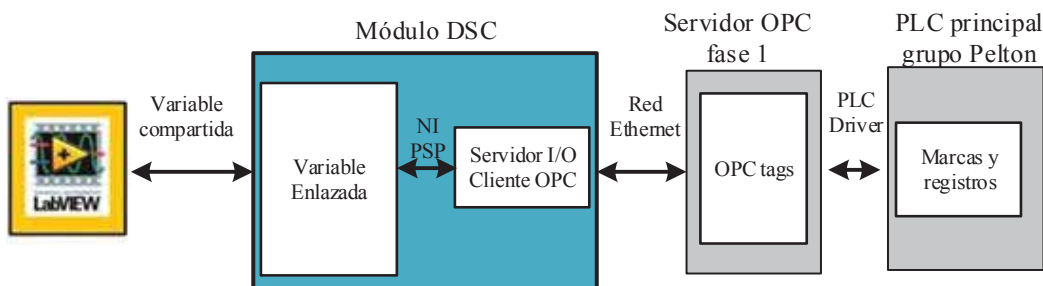


Figura 3-27. Esquema de conexión cliente y servidor OPC para el PLC Alspa C80-35.

Fuente: Elaboración propia

Las marcas (memorias tipo M) y registros (registros de 16 bits tipo R) del PLC principal requeridos para la aplicación son los siguientes:

Tabla 3-9. Variables de conexión OPC con el PLC Alspa C80-35.

PLC	Modo	OPC tags	Variable enlazada	Descripción
<b>R1659</b>	Lectura	G1_MW	G1_MW	Potencia activa
<b>R5303</b>	Lectura/escritura	G1_APER	G1_APER	Apertura en %
<b>R5305</b>	Lectura/escritura	G1_REF_POT	G1_REF_POT	Referencia de potencia
<b>R1198</b>	Lectura	G1_MODE	G1_MODE	Modo de control de grupo

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.9.3. Desarrollo del programa principal del controlador difuso

Una aplicación en el programa de desarrollo LabVIEW se llama VI (Instrumentos virtuales), ya que su apariencia y operación generalmente imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. Cuando se crea un nuevo VI, el programa muestra dos ventanas: la ventana del panel frontal y el diagrama de bloques. En la ventana del panel frontal se realizó el diseño del interfaz de usuario para el VI del proyecto, utilizando los controles e indicadores gráficos que posee esta herramienta de diseño. Por otro lado, el algoritmo de control de nivel de agua desarrollado en la Figura 3-11, se implementó usando la ventana de diagrama de bloques del VI del proyecto. El diagrama de bloques está conformado por nodos interconectados, a través de sus entradas y salidas. Los nodos son análogos a instrucciones, operaciones, funciones y subrutinas en los lenguajes de programación basados en texto.

La implementación del algoritmo de control automático descrito en la Figura 3-11 tiene siete sub-diagramas de bloques principales los cuales son los siguientes:

1. Inicializar variables y cargar el sistema difuso (archivo .fs).
2. Lectura de variables de entrada y alarmas.
3. Acondicionamiento de la señal de nivel.
4. Cálculo de error y pendiente.

5. Controlador difuso.
6. Escritura de apertura.
7. Visualización y registro de variables.

Se ha seleccionado la estructura de bucle de ejecución temporizada (timed loop) como bucle de ejecución del programa principal. Este tipo de bucle permite manipular la fuente interna del reloj, que en este caso, se fijó en 1kHz. En otras palabras, el programa LabVIEW ejecutará una iteración en un milisegundo (1 ms). Además, permite especificar el número de procesador, valor por defecto es -2, lo que significa que LabVIEW asigna automáticamente un procesador del computador.

La ventaja de este tipo de bucle, frente a los otros bucles de ejecución, permite especificar el periodo de ejecución de los sub-diagramas del programa. El parámetro  $dt$  es el periodo de ejecución del bucle temporizado. Todo el programa se ejecuta una sola vez en ese periodo; esto permite que el procesador maneje otras tareas durante el tiempo de espera, con lo cual, se evita recalentamiento del procesador del computador por sobrecarga.

Todo los sub-diagramas principales de la aplicación, desarrollado en este proyecto, se ejecutan con periodo de  $dt = 1000ms$ ; excepto el número seis que se ejecuta en bucle de periodo de  $dt = 60,000ms$  que equivale a un minuto, se ha fijado en 1000ms para coincidir con velocidad de adquisición de datos por el servidor OPC del SCADA de fase II.

El sub-diagrama número seis, que contiene el código de escritura de apertura, se ejecuta con periodo distinto. Este periodo de actualización de salida se ha fijado teniendo en cuenta el tiempo de respuesta del sistema, es decir, 60 segundos es el tiempo que se tiene que esperar para ver un cambio en el nivel de agua frente a un cambio de apertura. En programa este dato será variable para buscar la mejor respuesta del controlador difuso.

El código adjunto en el Anexo A, tiene la estructura de la Figura 3-28; en el lado izquierdo tiene las instrucciones de inicializar las variables utilizadas en el programa. En esta parte del código, también, se configura el eje del tiempo de las tendencias de las variables en el interfaz de usuario,

donde se define el tipo de datos en el eje de las abscisas y se establece el offset del eje a la hora actual del sistema. Antes de ejecutar el bucle principal se carga el archivo (.fs) a través de la dirección del archivo (file path) del sistema difuso diseñado previamente. Estas instrucciones son ejecutadas solo en el arranque del programa, cuyos datos son cargados al túnel de entrada en el borde del bucle temporizado, los cuales, serán leídos por los nodos que se ejecutan dentro del bucle principal.

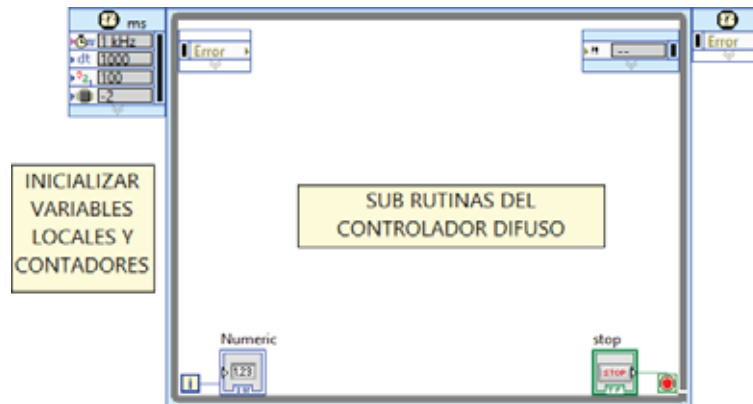


Figura 3-28. Bucle de ejecución infinita temporizada de labVIEW.

Fuente: elaboración propia

Una de las principales sub-diagramas del programa es el bloque de controlador difuso (*Fuzzy Controller*), que es el cerebro del controlador difuso. En este bloque se evalúa la salida según los valores de entrada y las reglas del sistema difuso diseñado.

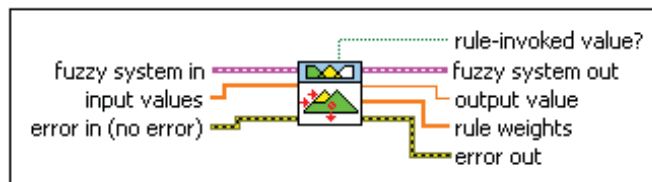


Figura 3-29. Bloque de Fuzzy Controller.

Fuente: Elaboración propia

El sistema difuso, diseñado previamente, se carga por la entrada *fuzzy system in* y las variables de entrada se insertan por *input values*, en forma de arreglo de dos elementos (error y pendiente de

error). El bloque tiene una salida de tipo real (ouput value), salida que fue previamente desfuzzificado en el bloque de controlador difuso para aplicar al actuador. En este caso, este valor se escribe en el registro de apertura (R5303) del PLC principal del grupo Pelton. La salida real de este bloque, antes de ser enviado, se evalúa las siguientes condiciones: lectura de nivel de agua sin error, conexiones de OPC sin falla, potencia del generador entre 3 y 28 MW, modo de operación del grupo en local y por último ejecuta el bucle escritura cuando el sistema de control automático se encuentra activado.

### **3.10. Implementación del interfaz de usuario**

El componente principal y la más útil del sistema SCADA es el interfaz de usuario, que fue diseñado e implementado en el programa de LabVIEW, en un computador de escritorio ubicado en el centro de control de la planta. Los datos de nivel de agua, potencia eléctrica del generador y la apertura de los inyectores de la turbina son variables del sistema automatizado, por ende, estos datos y los otros parámetros de los controladores son monitoreados en el interfaz de usuario.

La interfaz gráfica del SCADA le permitirá al operador conocer en todo momento el estado de nivel de agua, mediante la visualización de tendencias de las variables controladas y manipuladas del sistema de control y su estado en tiempo real. Mediante esta aplicación será posible activar o desactivar el sistema de control difuso y la visualización y reconocimiento de las alarmas del sistema.

El interfaz de usuario del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II, desarrollada e implementada en el programa LabVIEW, consiste en cuatro paneles de control y supervisión los cuales son:

1. Interfaz de operador (pantalla principal).
2. Tendencia de nivel de agua y potencia del generador.
3. Tendencia de las variables de entrada y salida por unidad (p.u.).

4. Monitor de variables locales del programa.

La pantalla principal está diseñada con botones de control del sistema automático y de la aplicación, es decir, permite al operario interactuar de manera amigable con el sistema. Las acciones de control que permite realizar esta pantalla principal son los siguientes:

- El operario puede activar o desactivar el control automático de nivel de agua en la cámara de carga II.
- Permite visualizar la tendencia de nivel de agua en la cámara de carga II.
- Permite visualizar el valor de apertura actual de los inyectores de la turbina Pelton.
- Permite ingresar el valor de referencia de nivel que está restringido de  $-0.50$  m al  $-0.90$  m y que por defecto está fijado en  $-0.70$  m.
- Cuenta con indicadores de alarmas.
- Cuenta con botón stop para detener la aplicación de LabVIEW.



Figura 3-30. Prototipo del interfaz de usuario principal.

Fuente: Elaboración propia

La segunda pantalla es para mostrar las tendencias de las variables del sistema: nivel de agua y



potencia del generador.

La tercera pantalla de la Figura 3-31, muestra la evolución en el tiempo las señales de entrada y salida del controlador difuso, el error, pendiente de error, los valores de referencia de nivel y apertura por unidad (p.u.). Estas gráficas fueron diseñadas para sintonizar el controlador difuso, con la finalidad de ver la evolución de los parámetros del sistema de manera detallada que tiene capacidad para mostrar los datos en un periodo de dos horas.

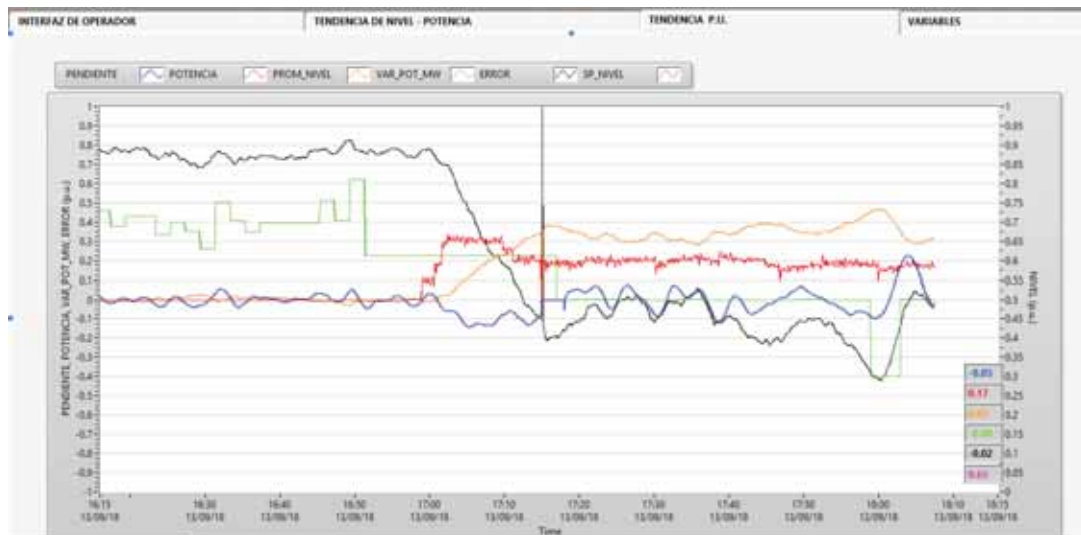


Figura 3-31. Pantalla de tendencias de variables (p.u.)

Fuente: Elaboración propia

La última pantalla fue diseñada para ver las variables puntuales, durante la prueba del sistema de controlador automático. La opción *file path* permite cargar el diseño del sistema difuso (que consiste en un archivo .fs). Desde esta pantalla se pudo modificar algunos parámetros con la finalidad de buscar la mejor respuesta del sistema.

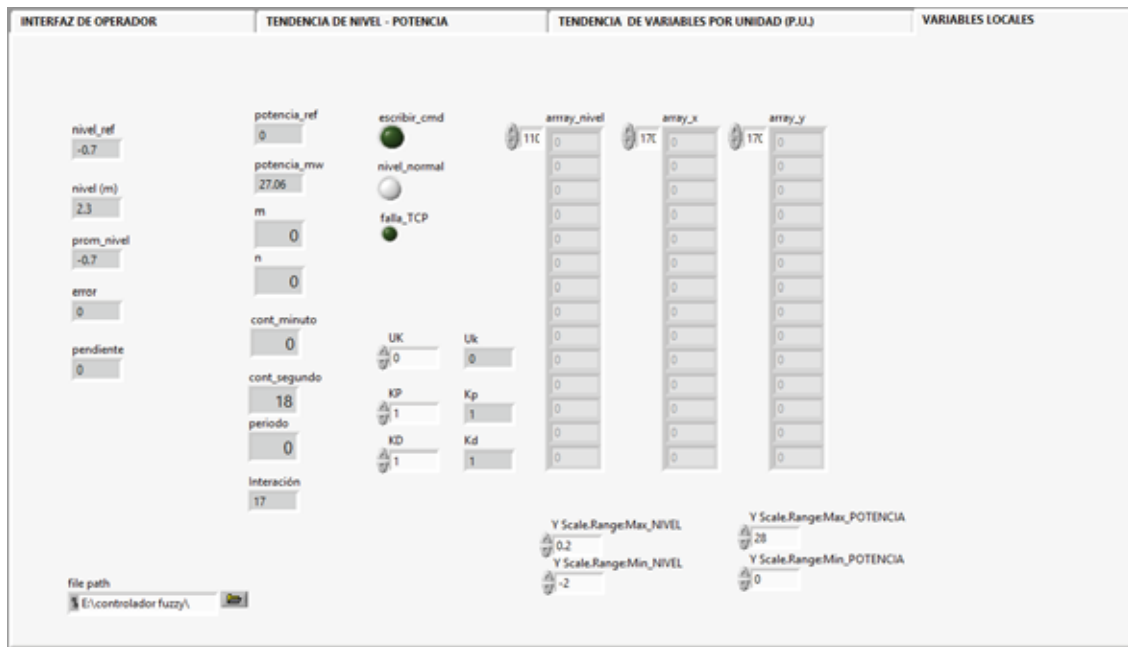


Figura 3-32. Interfaz de monitoreo de las variables locales del programa.

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. Introducción

Concluido con el diseño del controlador difuso, desarrollo del prototipo del interfaz de usuario y con las configuraciones de las conexiones cliente y servidor OPC; se procedió con las pruebas de conexiones de lectura y escritura de variables fuera de línea (con el grupo Pelton parado); posteriormente, se procedió con las pruebas de funcionamiento del controlador difuso en un grupo Pelton acoplado al SEIN. En los siguientes párrafos se presenta los resultados de dichas pruebas.

#### 4.2. Prueba del controlador difuso proporcional con potencia

Hay dos formas de controlar la carga de la turbina, una es por ajuste de consigna de potencia del generador al valor deseado entre 3 MW y 28 MW y el otro es por consigna de apertura de los inyectores de la turbina, este último es el método más usado. Los dos métodos son equivalentes, es decir, 0 % de apertura es 0.0 MW (Grupo fuera de servicio), 100 % de apertura equivale a 30.0 MW (carga nominal de la turbina). Para poder escribir la salida del controlador difuso en unidades de potencia, basta con multiplicar con el factor de conversión  $K_u$ . Por ende, el rango de salida fijado de -6 % a +6 % de la Figura 3-18, se convierte de -1.80 MW a +1.80 MW. Los factores de escalamiento para esta prueba fueron los siguientes  $K_p=1$  y  $K_u=0.30$ .

Las primeras pruebas del controlador difuso se realizaron variando la potencia del generador con una sola entrada (error de nivel de agua), con cinco, siete y nueve funciones de pertenencia. Sin embargo, los resultados no fueron los esperados. Por tanto, se tuvo que abortar todas las pruebas. Los resultados obtenidos con cinco y siete funciones de pertenencia no fueron favorables, sin embargo, con nueve funciones de pertenencia se logró al menos obtener la tendencia de nivel de agua (como se muestra en la Figura 4-1). En el gráfico se puede observar una oscilación de la tendencia de nivel de agua próximo al punto de referencia fijado en -70 cm (color naranja). En esta prueba, la tendencia de nivel resultó oscilando de -40 cm al -110 cm, cuyo resultado no es

aceptable. La tabla de FAM con la que se realizó esta prueba es netamente proporcional con nueve funciones de pertenencia.

Tabla 4-1. Matriz de asociación difusa con nueve funciones de pertenencia proporcional.

Error	ENG	ENM	ENP	EN	EZ	EP	EPP	EPM	EPG
Salida	SNG	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPG

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con la configuración de la matriz anterior se muestran en la siguiente figura, donde se puede notar que mientras el error está por debajo de la referencia de nivel de agua (línea naranja) la potencia sigue bajando, a pesar de que, la pendiente de nivel de agua está de subida (tendencia azul). Cuando pasa la referencia de nivel de agua, la potencia sube hasta que la tendencia de nivel vuelve a cruzar la referencia con pendiente negativo. Y así, el nivel de agua sube y baja, al igual que la potencia, no llegando a mantenerse en la banda de nivel de agua aceptable de -50 cm a -90 cm.

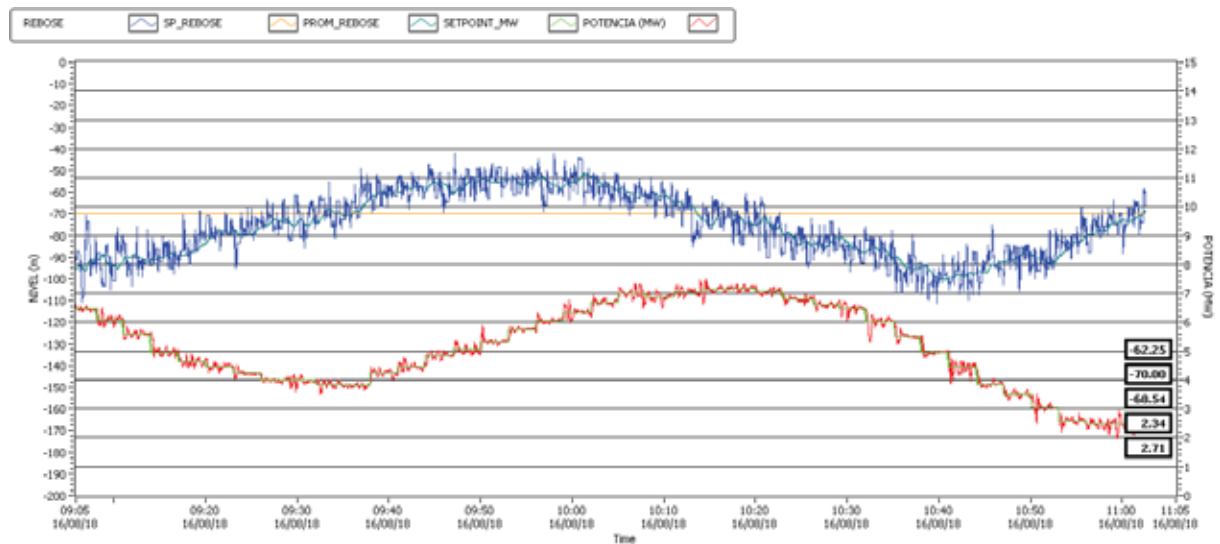


Figura 4-1. Tendencia de nivel de agua de la cámara de carga II y potencia del generador Pelton.

Fuente: Este gráfico fue obtenido de la interfaz de usuario diseñado.

Leyenda:

- Línea color naranja: Referencia de nivel (-70 cm).
- Tendencia de color azul: nivel de agua en la cámara de carga II (en cm).
- Líneas de color verde limón: variación de consignas de potencia del generador Pelton (MW).
- Tendencia de color rojo: Potencia del generador Pelton (MW).
- Tendencia de color verde: tendencia de nivel de agua suavizada, con la técnica promedio móvil para  $n=120$  muestras.

### 4.3. Prueba de controlador difuso proporcional-derivativo con potencia

Posteriormente, se rediseñó el controlador difuso con dos entradas, error y pendiente de error, con nueve y tres funciones de pertenencia respectivamente. Después de algunas pruebas parciales con diferentes configuraciones de FAM rediseñado (con 27 reglas de inferencia difusa), se presenta la siguiente tabla con la que se probó, con las cuales, se obtuvo una mejor respuesta que la prueba anterior del controlador difuso.

Tabla 4-2. Matriz de asociación difusa con 27 reglas de control difuso.

		error								
		ENG	ENM	ENP	EN	EZ	EP	EPP	EPM	EPG
pendiente	PN	SNG	SNG	SNM	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP
	PZ	SNG	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPG
	PP	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPM	SPG	SPG

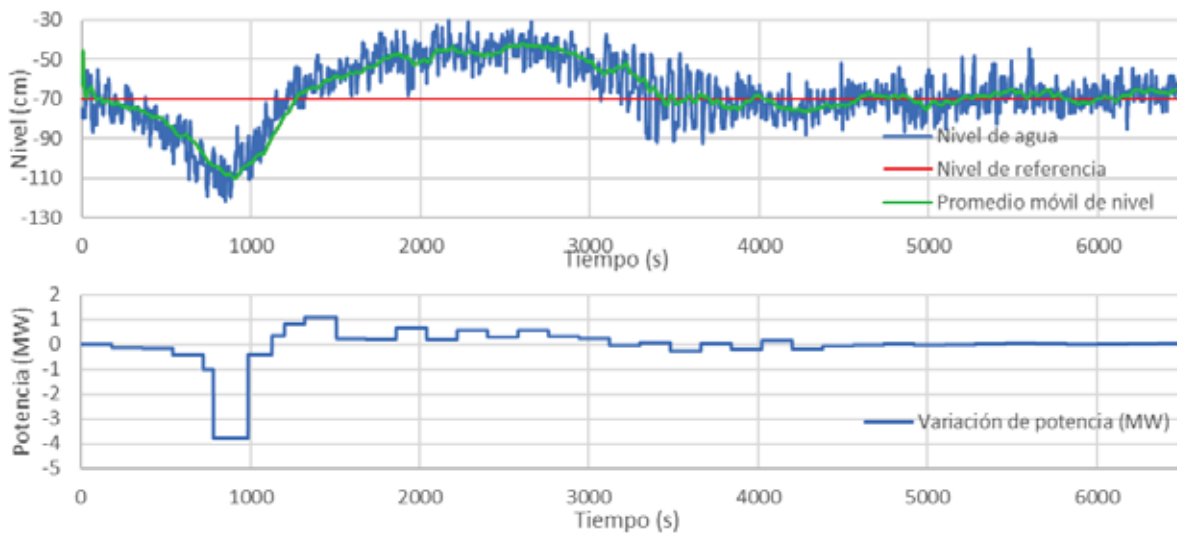
Fuente: Elaboración propia

Los parámetros con los cuales se obtuvo la respuesta de la Figura 4-2 fueron los siguientes:  $K_p=1$ ,  $K_d=100$ ,  $K_u=0.30$ ,  $n=120$ ,  $m=180$  y periodo de actualización de salida se tomó dos minutos. Esta prueba se ha realizado con las siguientes configuraciones de cargas de los generadores, con el grupo Pelton G3 seleccionado para control de nivel de agua automático:

- G1 acoplado al sistema eléctrico (SEIN) con potencia 9 MW constante.

- G2 acoplado al sistema eléctrico con potencia 16 MW constante.
- G3 en modo de control automático de nivel de agua en la cámara de carga habilitado y acoplado al sistema eléctrico.
- G4 acoplado al sistema eléctrico con carga nominal 101.35 MW constante.

El controlador se activó cuando el nivel estaba con una pendiente negativa, el propósito fue ver la respuesta del controlador frente a esta variación de nivel. En la tendencia de salida (potencia en MW), se puede ver que en el punto más bajo de nivel de agua (próximo a 1000 s), el controlador llega a variar la referencia de potencia en -4.50 MW en total aproximadamente.



*Figura 4-2. Tendencia de nivel de agua en la cámara de carga II y la salida del controlador difuso en MW.*

*Fuente: Elaboración propia*

Posterior a la variación de la potencia generada por el controlador difuso, lo cual es correcto (porque de lo contrario el nivel pudo alcanzar nivel de alarma), el nivel de agua tiende a regularse, acercándose al nivel de referencia con una pendiente positiva pronunciada (tramo 1000–1500 s de la Figura 4-2). En este tramo, ya que la pendiente es positiva, el sistema de control difuso aumenta gradualmente la potencia hasta que el nivel de agua en la cámara de carga II se mantenga constante

alrededor del punto de referencia (tramo 3500–6000 s de la Figura 4-2). En este último tramo la variación de consigna de potencia es mínima (como se puede en la tendencia de la salida, potencia de generador Pelton).

En la tendencia de nivel de agua de la Figura 4-2, se puede observar que para el periodo de actualización seleccionado (dos minutos), la variable controlada tiende a estacionarse después de 3500 s que equivale aproximadamente a una hora. Así mismo, se observa un sobre pico que alcanzó hasta -30 cm de nivel de agua, saliéndose de la franja de nivel aceptable (-50 cm a -90 cm). La forma de respuesta visto en esta prueba es aceptable, sin embargo, aún queda por mejorar el tiempo de establecimiento y el sobre pico de nivel.

La Figura 4-3 muestra la tendencia de la variable ‘error’ y ‘pendiente’, el controlador difuso toma en cuenta la evolución de estas variables de entrada para poder determinar las ordenes de consigna de potencia. En el primer tramo (0–1000 s), el error tiene valores negativos y de hecho la pendiente también es negativa; a partir de estos datos, las consignas generadas por el controlador difuso son para bajar la potencia. Estas consignas y la magnitud de potencia son producto de la evaluación de las reglas de control de la tabla FAM (Tabla 4-2).

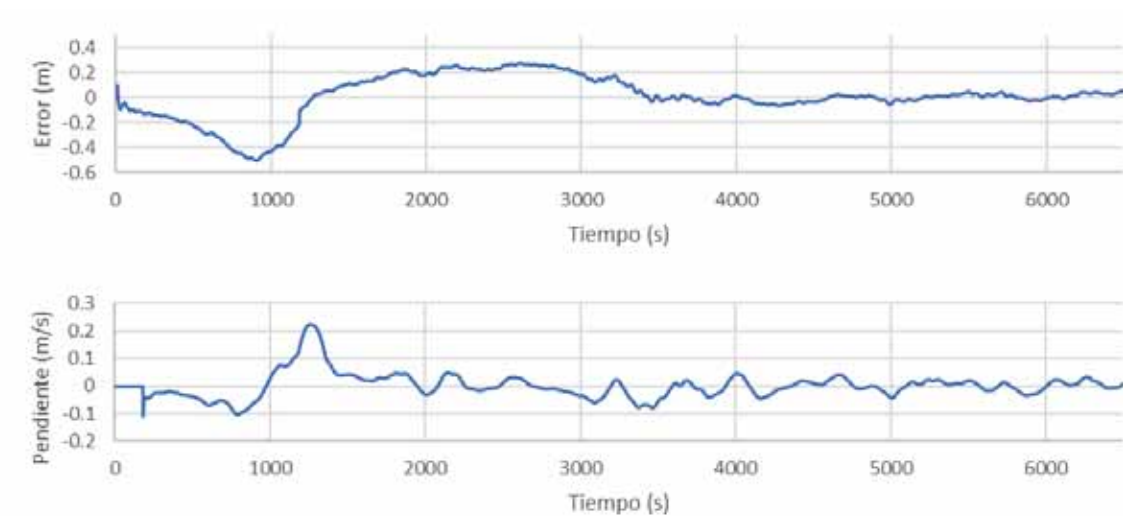


Figura 4-3. Tendencia de error y pendiente de nivel de agua en la cámara de carga II.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. Prueba del controlador difuso proporcional-derivativo con apertura

Para realizar esta prueba, se cambió el punto de referencia de nivel de agua, debido a que el punto de referencia fijado en el capítulo de diseño no era exactamente lo adecuado ( $-0.70\text{m}$ ), puesto que este valor se acerca más al nivel mínimo de diseño de nivel de agua según el plano de construcción de la cámara de carga II (adjunto en el Anexo G), donde el nivel mínimo de agua está fijado en  $2058.14\text{ m.s.n.m.}$ , esta referencia en la escala de medición de la Figura 3-7, equivale a  $-0.80\text{m}$ . En las pruebas anteriores se observó que cuando el controlador llega a mantener el nivel en el punto  $-0.70\text{m}$ , una perturbación de nivel de agua por aumento de carga en el sistema eléctrico tiende a variar rápidamente la tendencia de nivel de agua hacia abajo. Por esta razón se tuvo que cambiar el punto de referencia a  $-0.60\text{m}$ .

Esta prueba se realizó con la misma tabla FAM de la prueba anterior (Tabla 4-2). El ajuste de las ganancias de las entradas y salidas fueron los siguientes  $K_p=1$ ,  $K_d=100$ ,  $K_u=1$  y el periodo de actualización de salida un minuto. La configuración de carga de los grupos fueron los siguientes: G1 y G3 parados, G4 con carga  $94.1\text{ MW}$  y G2 seleccionado para realizar la prueba del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II.

Este resultado se acerca al esperado, Sin embargo, según la tendencia de nivel, todavía presenta picos de nivel de agua. Se ha logrado mantener el nivel en la franja  $-0.40\text{ m}$  a  $-0.80\text{ m}$ , con esto ya se estaría cumpliendo con lo especificado en el manual de operación de la planta en la franja  $-0.50\text{ m}$  a  $-0.90\text{ m}$ . Como se movió el punto de referencia a  $-0.60\text{ m}$ , la nueva franja aceptable en esta prueba es de  $-0.40\text{ m}$  a  $-0.80\text{ m}$ . La Figura 4-4 es una parte de la respuesta del controlador difuso de una prueba realizada en dos días.

La tendencia de apertura de la anterior se parece a la obtenida en la operación manual (ver Figura 3-8); sin embargo, la tendencia de apertura es más suave, no existe cambios bruscos como se observó en la tendencia de operación manual.



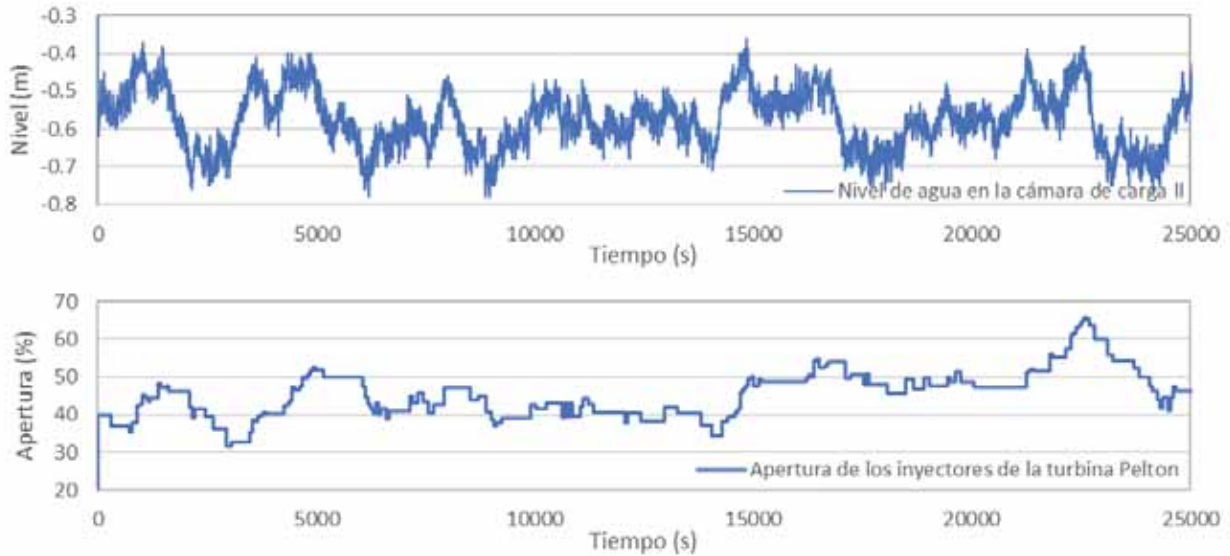


Figura 4-4. Resultados de la prueba del controlador difuso variando la referencia del porcentaje de apertura de los inyectores del grupo Pelton.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. Pruebas finales del sistema de control difuso

Las pruebas finales del controlador difuso se han realizado con nueve funciones de pertenencia para la entrada de error y salida, con tres funciones de pertenencia para la entrada pendiente de error. Con los cuales se obtuvo la mejor respuesta. La matriz FAM que se usó para esta prueba es la Tabla 4-3, la misma que tiene un cambio con respecto a la Tabla 4-2, las cuales, se resaltó con fondo amarillo. Esta modificación es con la finalidad de disminuir el tiempo de establecimiento para minimizar los sobre picos de nivel de agua en la cámara de carga II de la figura 4-4.

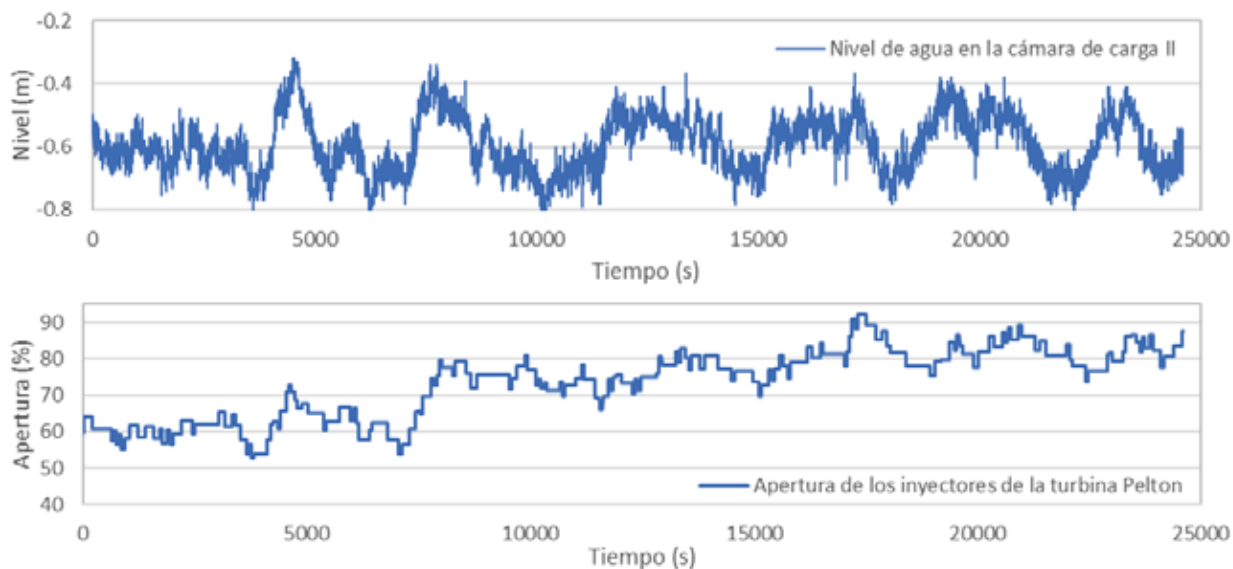
Tabla 4-3. Matriz de Asociación Difusa de la prueba final.

<b>Pendiente\error</b>	<b>ENG</b>	<b>ENM</b>	<b>ENP</b>	<b>EN</b>	<b>EZ</b>	<b>EP</b>	<b>EPP</b>	<b>EPM</b>	<b>EPG</b>
<b>PN</b>	SNG	SNG	SNM	SNM	SN	SZ	SZ	SP	SPP
<b>PZ</b>	SNG	SNM	SNP	SN	SZ	SP	SPP	SPM	SPG
<b>PP</b>	SNP	SN	SZ	SZ	SP	SPP	SPM	SPG	SPG

Fuente: Elaboración propia

Los factores de escalamientos se fijaron como sigue:  $K_p=1$ ,  $K_d=100$  y  $K_u=1$ . Los resultados

obtenidos con esta configuración de matriz de asociación difusa se muestran en la Figura 4-5. Este grafico es idéntico a las respuestas obtenidas en la Figura 4-4, donde se logró mantener la tendencia de nivel en la nueva franja  $-0.40$  m a  $-0.80$  m. En los puntos en que se aumenta el nivel de agua, se incrementó los porcentajes de apertura; la prueba inicio con 60 % de apertura y termina con 85 % aproximadamente. Es decir, viendo la tendencia ascendente de la apertura se puede inferir que el ingreso de agua hacia la planta ha estado aumentado gradualmente. Esta es una de las funciones principales del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga, ajustar la producción a medida que el caudal del túnel aumente y evitar la acumulación de agua en la cámara de carga y rebose.



*Figura 4-5. Resultados de las pruebas finales del sistema de control automático.*

*Fuente: Elaboración propia*

En la figura anterior se observa sobre picos en algunos puntos que llegan hasta  $-0.40$ m, posteriormente, la tendencia de nivel desciende hasta  $-0.80$  m; ya que con el controlador diseñado es difícil determinar el valor de apertura que se tiene que variar para evitar los sobre picos mostrados. Sin embargo, con la finalidad de mejorar la respuesta, en la siguiente prueba se ha ajustado más el periodo de actualización a 40 segundos, con lo cual se mejoró la respuesta del

controlador difuso. Además, no es necesario que la salida del controlador este actualizando todo el tiempo cuando la tendencia de nivel está en la nueva franja aceptable ( $-0.40$  m a  $-0.80$  m) y con una pendiente próxima a cero; para estos casos se agregó un código en el programa para dejar de actualizar la salida.

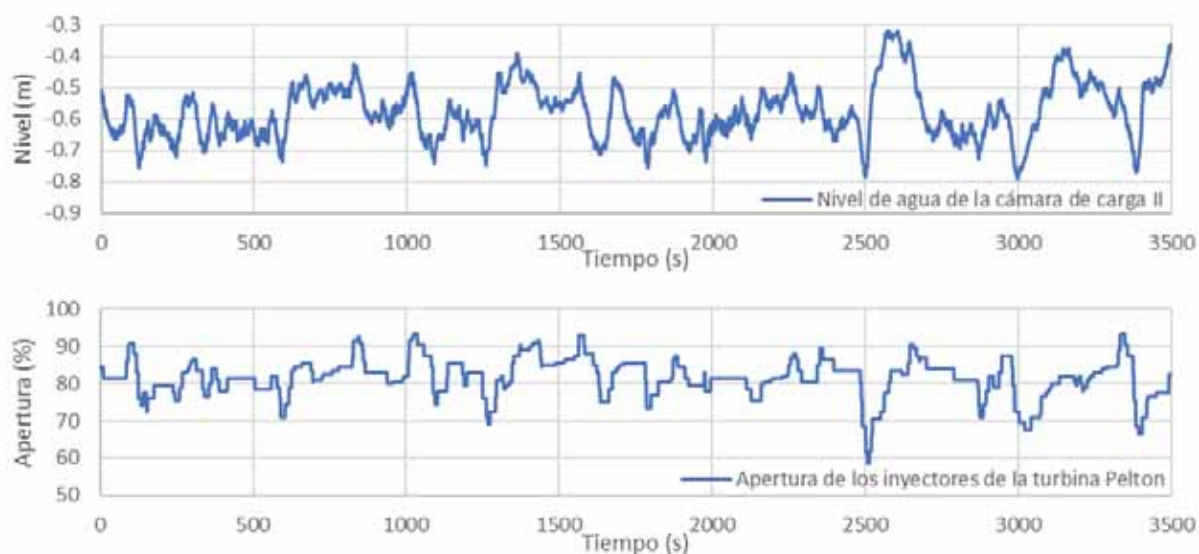


Figura 4-6. Resultados de las pruebas finales del sistema de control automático.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6. Análisis final de la respuesta del sistema de control difuso

En las pruebas se ha observado que el tiempo de establecimiento de la respuesta del controlador difuso depende de la magnitud de la perturbación en el flujo de entrada o en la salida de la cámara de carga II. Esto es, si la perturbación es de magnitud considerable, los cambios de nivel de agua también son pronunciados, por consiguiente, el tiempo de establecimiento también es prolongado. En cambio, para cambios pequeños en el flujo de entrada o salida de la cámara de carga, la variación de nivel de agua en la cámara de carga es muy lenta; por tanto, las variaciones de potencia también son mínimas. La causa principal que provoca variaciones pronunciadas en el nivel de agua en la cámara de carga II es la variación de potencia del grupo Francis, esto debido a la variación de frecuencia en la red eléctrica (como se puede ver en la Figura 4-7 tramo 8000 s a 18000 s).

Cuando la frecuencia sube, la potencia tiende a bajar; esto es la respuesta natural del sistema de control de velocidad y carga de la turbina. Como consecuencia de esta variación de frecuencia-potencia, se muestra la tendencia del caudal, este último es directamente proporcional a la variación de potencia, llegando a variar hasta  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  sobre el promedio del caudal (punto 14000 s de la Figura 4-7); con lo cual, el nivel de agua en la cámara de carga II tiende a bajar hasta alcanzar nivel de alarma. En este caso, el controlador difuso llega a bajar gradualmente con mayor rapidez, el porcentaje de apertura hasta en 30 % en total ( de 90 % a 60 %, punto 14000 s de la Figura 4-8).

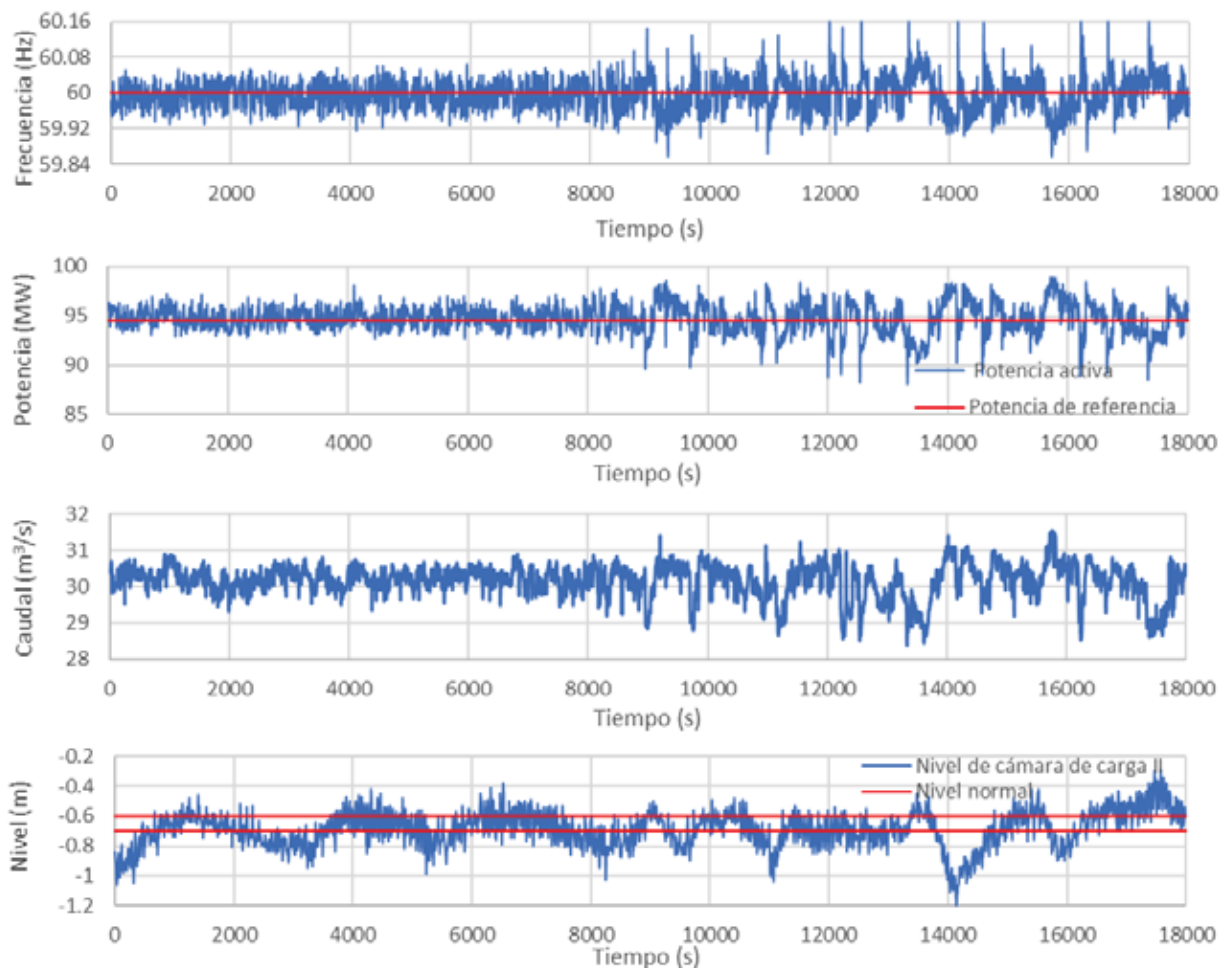


Figura 4-7. Análisis de los parámetros de grupo Francis durante la prueba.

Fuente: Elaboración propia (Registro obtenido de los servidores del SCADA fase II)

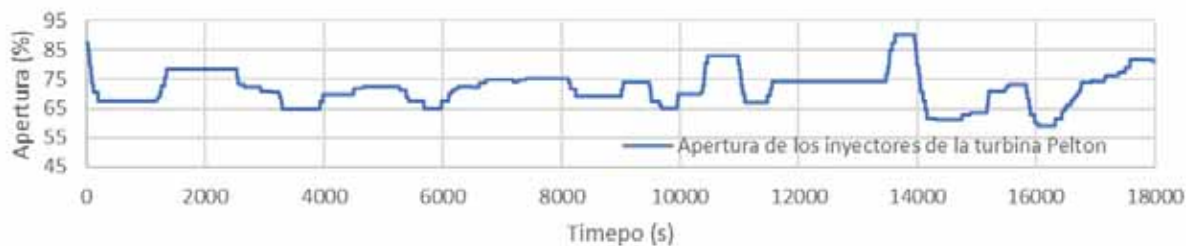


Figura 4-8. Tendencia de apertura de los inyectores de la turbina Pelton.

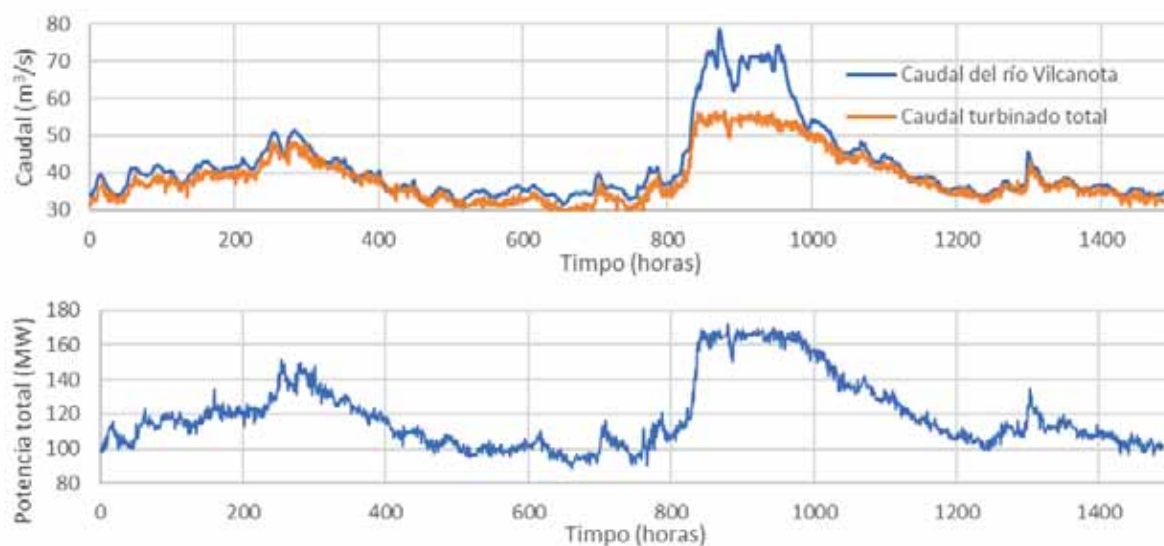
Fuente: Elaboración propia

En la implementación final del sistema de control difuso, se agregó un algoritmo de “*sleep mode*”, modo en el que, el controlador deja de enviar comandos de apertura al PLC principal del grupo Pelton cuando el nivel de agua en la cámara de carga II está en la franja normal y con una pendiente de variación próximo a cero (Esto se puede ver en la tendencia de la apertura, como líneas horizontales en la Figura 4-8). La banda de nivel normal está resaltado con dos líneas de color rojo horizontal, entre los puntos de  $-0.60$  m a  $-0.70$  m. Esta franja se ha fijado en el programa, para garantizar el nivel de agua en el rango especificado en el manual de operación de la planta ( $-0.40$  m a  $-0.80$  m).

Las pruebas finales del controlador difuso se han realizado en el mes de octubre 2019, con los cuatro grupos operando. En este mes, el aumento de caudal del río Vilcanota fue ascendente por aumento de lluvias; donde la producción de energía aumenta hasta llegar a un punto máximo (165 MW en el tramo 800 s a 1000 s de la Figura 4-9). En este caso, los factores limitantes son la capacidad del túnel de aducción, llegando a saturarse en un punto de caudal máximo.

La utilidad del controlador difuso es más efectiva en épocas de estiaje; donde todas las centrales hidroeléctricas reducen su carga al mínimo, el costo de energía en el mercado eléctrico sube. Por tanto, con este sistema se podrá evitar el desperdicio de agua por rebose. En esta época la central de Machupicchu llega a operar, inclusive, con un solo grupo generador Pelton. Además, se reduce la saturación de flujo en el túnel de aducción, haciendo que el flujo de agua sea más regular. En esta condición, la variación de nivel de agua tiende a ser más lento; esto ayuda al sistema de control

difuso a determinar variaciones pequeñas de apertura y mantener el nivel de agua en el punto de referencia. En todas las pruebas anteriores se observó que el nivel de agua no llegó a rebosar. Esto es una respuesta buena, además el error en el estado estacionario no es exigente. Mientras el nivel de agua se mantenga dentro de la franja de  $-0.40$  m a  $-0.80$  m, se considera, como buen desempeño del sistema de control difuso diseñado.



*Figura 4-9. Registro de caudal del río, caudal turbinado total y potencia total de la planta*

*Fuente: Elaboración propia*

Por definición, la cámara de carga es una pequeña presa. Según lo observado en las pruebas y monitoreos de nivel y caudal del túnel de aducción, se observa que, a medida que el caudal del túnel de aducción se acerca al máximo, se pierde la capacidad de acumulación de agua en la cámara de carga. Es decir, cuando la planta opera a media capacidad, por ejemplo en épocas de estiaje, la cámara y parte final del túnel de aducción tienen más espacio para acumular pequeñas cantidades de agua; que pueden ser turbinados en una variación de frecuencia cuando exista un cambio de potencia generada por cambios de carga en el sistema eléctrico.

#### **4.7. Puesta en marcha del sistema de control difuso**

Después de haber realizado y encontrado el mejor ajuste de los parámetros del controlador difuso, se pone en servicio el sistema de control automático de nivel de agua en los tres grupos Pelton. Para ello, se ha replicado el programa principal del controlador difuso para los tres grupos Pelton. Se ha rediseñado un interfaz amigable para el usuario final con dos paneles de visualización. El primero cuenta con el estado de los tres grupos, con indicadores de potencia y apertura, que permite seleccionar un grupo en específico para la regulación de nivel de agua en la cámara de carga II. Además, permite ingresar manualmente el porcentaje de apertura al grupo seleccionado con el fin de balancear las cargas cuando sea necesario o en ocasiones que el controlador de nivel automático falle. Así mismo, muestra estados lógicos de las alarmas del sistema automatizada. Por último, tiene una opción para desactivar y poner fuera de servicio el sistema de control difuso con el botón STOP (parar aplicación).

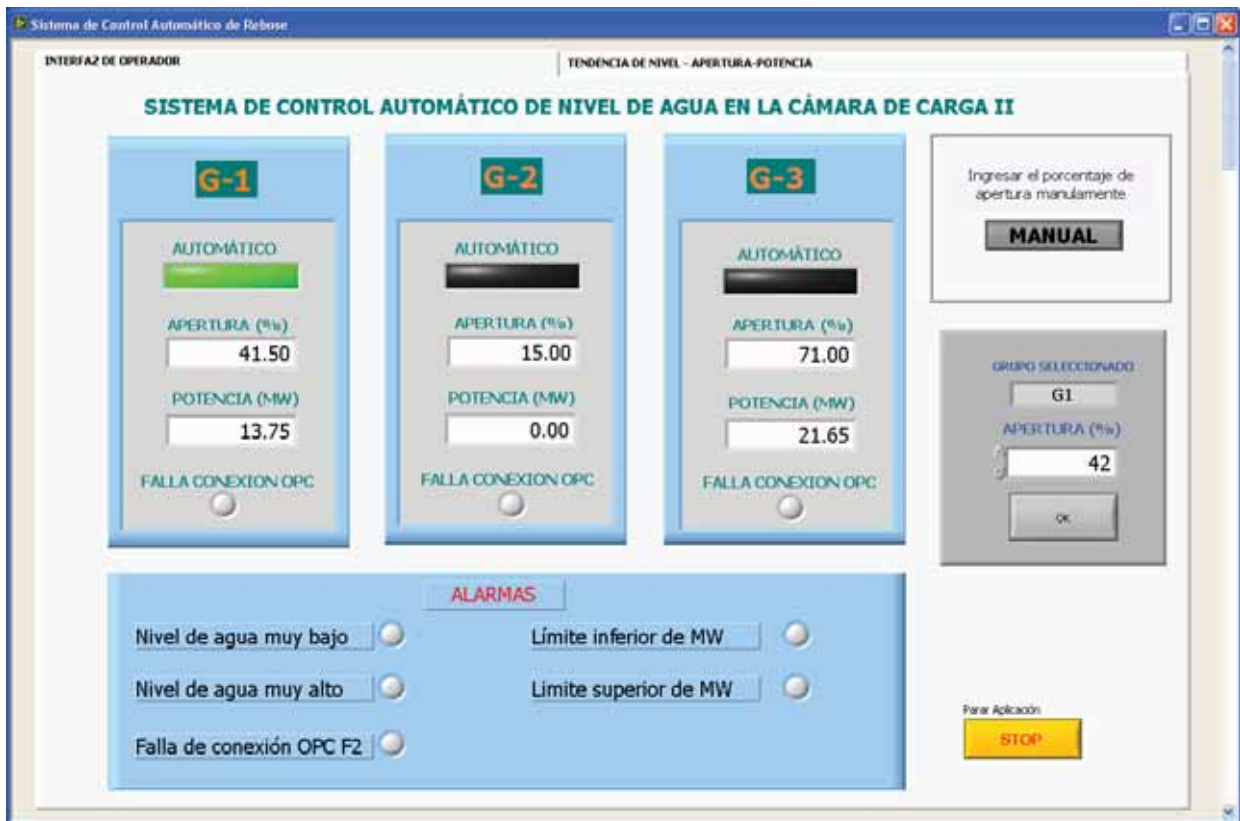
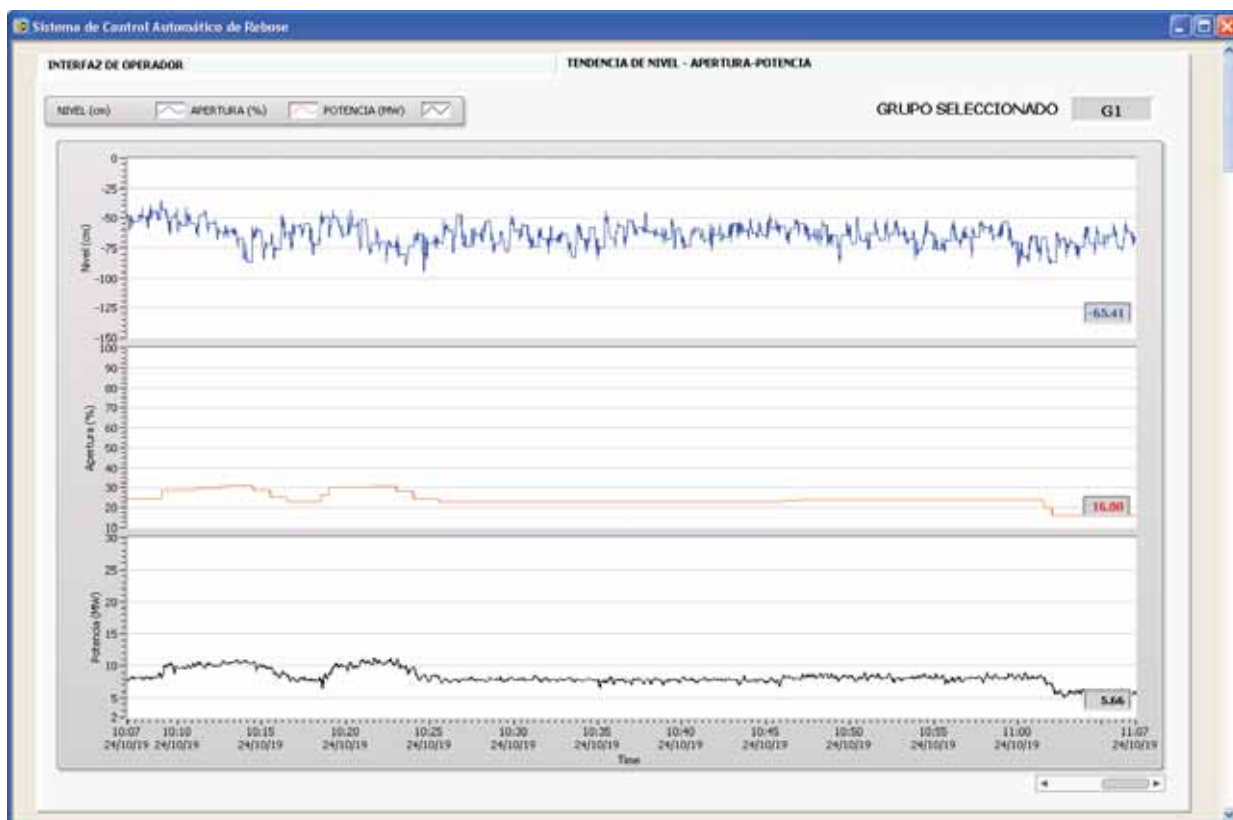


Figura 4-10. Interfaz de usuario unificado para los tres grupos Pelton.

Fuente: Elaboración propia

El segundo panel muestra la tendencia de nivel de agua en la cámara de carga II, la apertura de los inyectores y la potencia del grupo seleccionado para la regulación de nivel de agua en dicha cámara de carga. Las siguientes figuras son pantallas capturadas en pleno funcionamiento del sistema de control automático de nivel de agua basado en lógica difusa. El manual de usuario de la aplicación desarrollado se adjunta en el Anexo B.

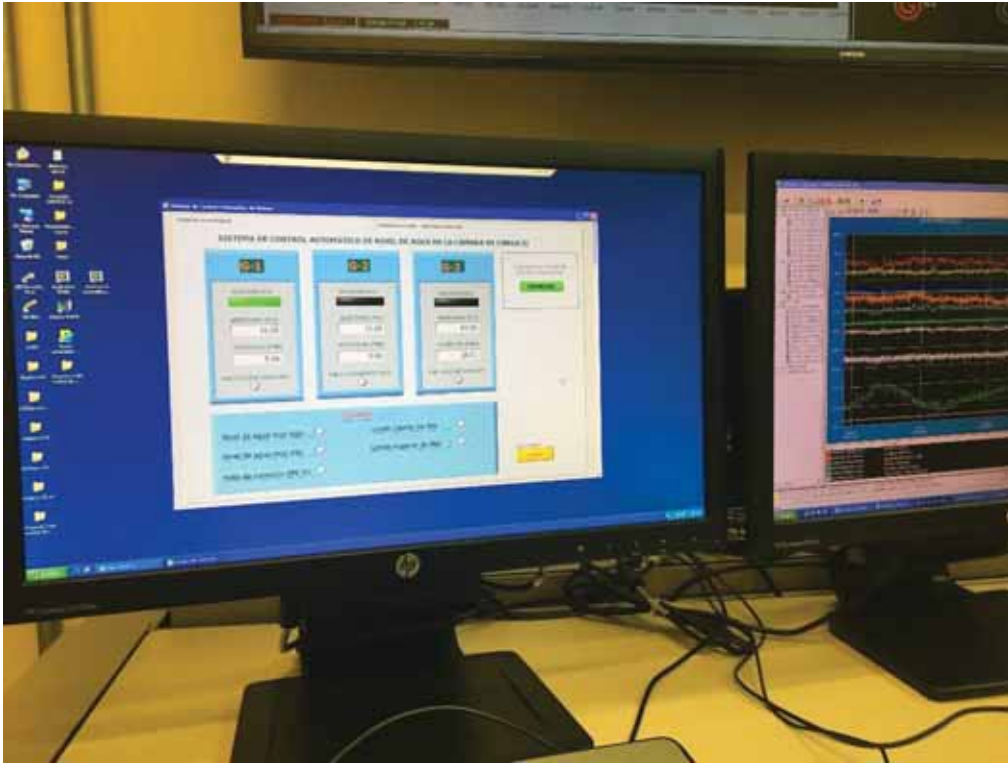


*Figura 4-11. Interfaz de usuario implementado, panel de tendencias.*

*Fuente: Elaboración propia*

La siguiente fotografía muestra el funcionamiento del interfaz de usuario implementado en la sala de control de la central, sala de control unificado de fase I y II. Sin embargo, este interfaz de usuario puede ser accedido a través del servidor web desde el centro de control de Dolorespata, por este medio, los encargados de la administración de la producción de energía puedan operar, activar o desactivar el sistema de control implementado.





*Figura 4-12. Puesta en funcionamiento del sistema de control difuso.*

*Fuente: fotografía*

## **CAPÍTULO VI**

### **COSTOS Y PRESUPUESTOS**

#### **5.1. Costo de equipos y materiales**

Este proyecto se ha desarrollado con los equipos propios de la empresa, la mayor parte de los sistemas o equipos involucrados ya venían operando en la planta. El costo del proyecto está más en el recurso humano, el tiempo que se demoró en desarrollar y la dificultad para integrar estos equipos en un sistema de propósito específico y realizar los ajustes para probar, posteriormente, implementar el sistema de control difuso. Para implementar el controlador difuso, se ha seleccionado un computador disponible en el stock de equipos repuestos para el mantenimiento del sistema SCADA de fase II, en una PC de escritorio donde fue instalado el programa LabVIEW 2013, al cual, se le denominó PC LabVIEW que hace la función de Gateway conectado a dos redes de SCADA de la planta Fase I y II.

Los dispositivos o equipo con los que se trabajó, que ya venían operando en la planta, son los siguientes: conmutadores de la red que forman parte de las infraestructuras de las redes de control de la planta Fase I y II, cableado estructurado incluido los enlaces de fibra óptica y los equipos media convertidores de fibra óptica, el transmisor de nivel y el PLC de cámara de carga II, servidores de datos del sistema SCADA fase II y el PLC de los grupos Pelton.

Otros equipos, por ejemplo, una laptop personal que se usó para la programación de la aplicación y redacción de informes del proyecto, materiales de prueba, cables de red Ethernet (patch cord) fueron proporcionados por parte del tesista.

#### **5.2. Costo de mano de obra**

El siguiente cuadro de actividad es para mostrar el orden de ejecución de estas, a fin de cuantificar el tiempo que se demoró realizar cada actividad en horas-hombre. Se indica que la implementación se realizó en el año 2018 y 2019 en los meses resaltados en la siguiente tabla.

Tabla 5-1. Resumen de las actividades desarrolladas

No	Actividad	Año 2018			Año 2019		
		Junio	Julio	Agosto	Agosto	Sept.	Oct.
1	Levantamiento de información de la planta hidroeléctrica. Planteamiento del esquema de solución	20h					
2	Preparación del hardware, instalación de software, configuración de la PC, y pruebas de conexión OPC.	30h					
3	Diseño del controlador difuso, interfaz de usuario .		50h				
4	Realización de primeras pruebas del diseño			Dos semanas			
5	Rediseño del sistema de control de difuso e interfaz de usuario para los tres grupos Pelton.				40h		
6	Primeras pruebas del sistema de control rediseñado.					Una semana	
7	Pruebas finales y puesta en marcha						Dos semanas

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un cuadro de costos aproximados de mano de obra del tesista. Los gastos de viáticos de traslado y estadía del tesista en el campamento de la central hidroeléctrica fueron cubiertos por la empresa. Ya que, el proyecto fue desarrollado en las instalaciones de la planta.

Tabla 5-2. Cuadro de costos de mano de obra

Ítem	Unidad	Cant.	Precio/und.	Total
Honorarios del tesista	Horas hombre	340	S/ 50.00	S/ 17,000.00
			Total	S/ 17,000.00

Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Presupuesto

En el siguiente cuadro se presenta un resumen del presupuesto de inversión para la implementación del proyecto en los tres grupos generadores Pelton. Las pruebas del sistema de control difuso se han realizado con equipos propios de la empresa y con software en versión de prueba. Sin embargo, se incluye en este cuadro de presupuestos para tener en cuenta el costo que demandaría el licenciamiento del software para la implementación definitiva. Los costos del software LabVIEW, indicados en la siguiente tabla son referenciales y fueron obtenidas de la página web (www.ni.com y www.amazon.com) y el software servidor OPC fue obtenida de la página web del desarrollador, www.kepware.com.

*Tabla 5-3. Cuadro de presupuesto*

<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant.</b>	<b>Precio/und.</b>	<b>Total</b>
<b>Estación de trabajo HP Z400</b>	Referencial	1	\$ 319.95	\$ 319.95
<b>Una laptop de ingeniería</b>	Referencial	1	\$ 550.00	\$ 550.00
<b>Software LabVIEW Completo</b>	Referencial	1	\$ 3848.95	\$ 3848.95
<b>Módulo de registro de datos y control supervisorio de LabVIEW (DSC)</b>	Referencial	1	\$ 3595.78	\$ 3595.78
<b>Software OPC KEPServerEX</b>	Referencial		\$ 452.00	\$ 452.00
			<b>Total</b>	<b>\$ 8,766.68</b>

*Fuente: Elaboración propia*

## CONCLUSIONES

1. El sistema de control basado en lógica difusa ha sido implementado y probado en los tres grupos Pelton, individualmente, con un prototipo de interfaz de usuario de ingeniería que facilitó la búsqueda de la mejor respuesta de este sistema. Para el diseño de este sistema se utilizó los datos del nivel de agua registrados durante la operación manual. Las reglas de control difuso se configuraron en base a los conocimientos del experto en la regulación. En las pruebas finales, con la sintonización apropiada del controlador difuso, se logró mantener el nivel de agua en la cámara de carga dentro del margen requerido, con un error  $\pm 0.20$  m con respecto a la referencia del nivel de agua.
2. La respuesta más favorable se obtuvo con los siguientes valores de los parámetros del controlador difuso:  $n=120$ ,  $m=180$ ,  $K_p=1$ ,  $K_d=100$ ,  $K_u=1$ . El periodo de actualización de salida, después de las pruebas correspondientes, se fijó en 40 segundos.
3. Inicialmente, para el diseño, se eligió el punto de referencia de nivel de agua en  $-0.70$  m por debajo del rebose, con lo cual, en las pruebas se obtuvo resultados no favorables. Para realizar las últimas pruebas se tuvo que cambiar este valor de nivel de referencia a  $-0.60$ m, con este valor de referencia se logró mantener el nivel de agua en la cámara de carga II dentro de la franja  $-0.40$  m a  $-0.80$  m.
4. El estándar de comunicación OPC seleccionado resultó ser confiable para la aplicación desarrollada en LabVIEW; porque no ha presentado fallas durante todas las pruebas y puesta en servicio del sistema de control difuso.
5. Con el sistema de control implementado, la regulación del nivel de agua es continua; mientras que con la técnica de regulación manual, el operario actúa después de la alarma de nivel muy bajo o viendo que el agua ya está rebasando. Un ajuste continuo de potencia generada en función al nivel de agua en la cámara de carga y flujo del túnel de aducción

incrementa la producción de energía en la central hidroeléctrica de Machupichu.

6. Después de las pruebas finales, se ha rediseñado el interfaz de usuario para que sea más amigable para el usuario final. Un interfaz unificado para los tres grupos que permite seleccionar un solo grupo Pelton, a la vez, para la regulación de nivel de agua en la cámara de carga II. Además, cuenta con una opción manual para balancear la carga de las turbinas con la finalidad de tener margen de potencia en el grupo seleccionado. En posteriores diseños, se puede agregar otras funciones adicionales que ayuden con la operación óptima de la planta y así, aprovechar al máximo el recurso energético del río Vilcanota.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda seguir los siguientes pasos para poner en funcionamiento el sistema de control diseñado: seleccionar un grupo Pelton, llevar manualmente la tendencia de nivel de agua a la franja aceptable y finalmente, activar el sistema de control automático de nivel de agua desde el interfaz del usuario implementado en este proyecto.
2. Se recomienda desactivar el sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II durante el proceso de parada o arranque de algún grupo generador. Cuando se para un grupo siempre es necesario la intervención del operario, para aumentar la carga a los otros generadores, es decir, balancear la carga de los generadores. Para lo cual, se puede usar el ajuste de porcentaje de apertura desde la opción manual del interfaz de usuario implementado.
3. Todas las pruebas se han realizado con un solo transmisor de nivel ultrasónico. Para mayor precisión de control de nivel de agua, se recomienda instalar más de dos transmisores para tener mayor exactitud en la medición, en varios puntos alineados transversalmente al flujo de agua en la cámara de carga II.
4. En las posteriores mejoras del sistema diseñado en este proyecto, se recomienda ajustar el controlador difuso para cada condición de operación de la central hidroeléctrica; es decir, con uno, con dos, con tres y con los cuatro grupos funcionando simultáneamente.

## BIBLIOGRAFÍA

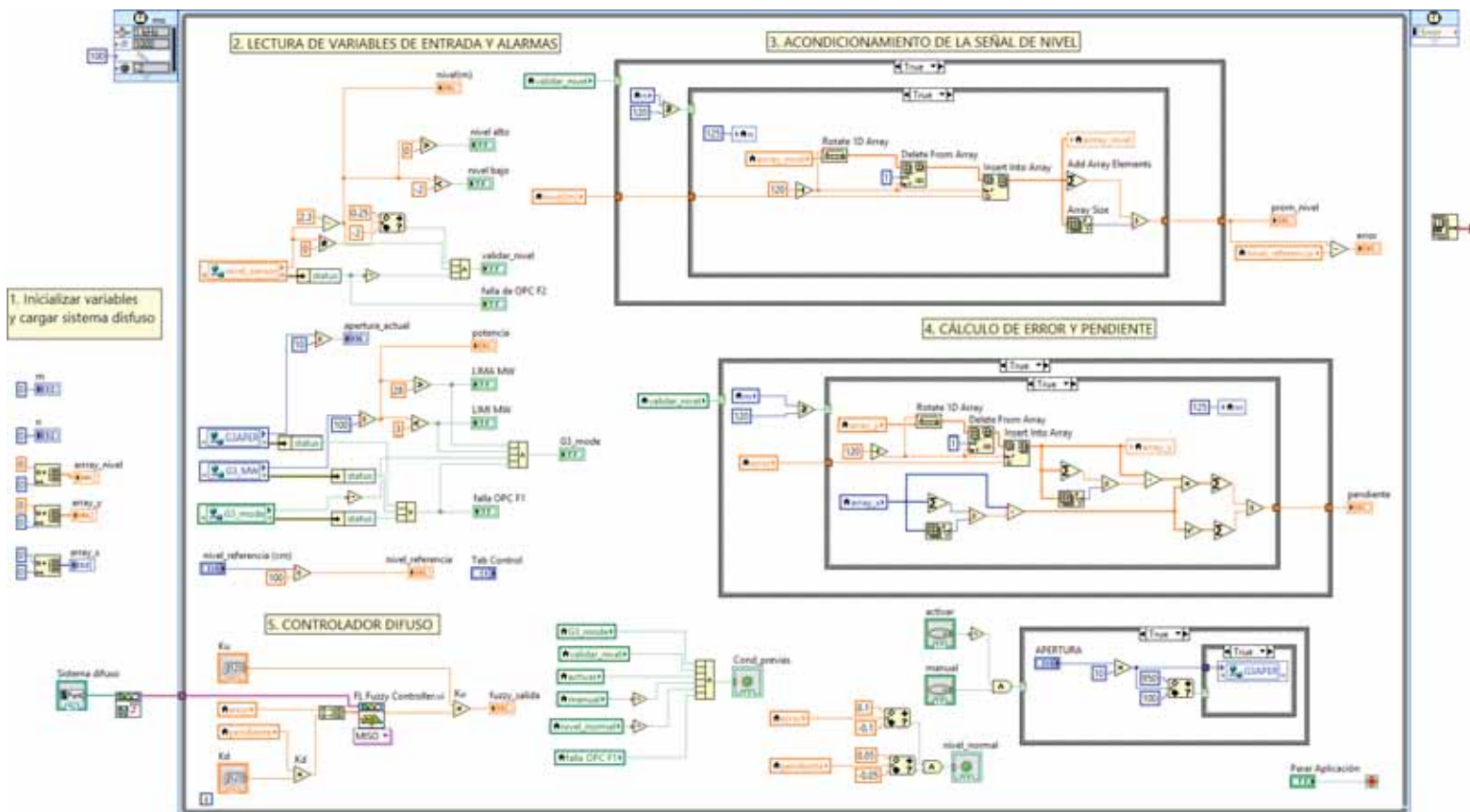
- F. Jiménez, O., & M. Hanif, C. (1992). *Water-Level Control in Hydropower Plants*. ASCE.  
Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/245289208\\_Water-Level\\_Control\\_in\\_Hydropower\\_Plants](https://www.researchgate.net/publication/245289208_Water-Level_Control_in_Hydropower_Plants)
- Peréz Díaz, J. I., J. R., W., García Gutiérrez, P., Fraile Ardanuy, J., Fraile Mora, J., Sanchez, J. A., & Sarasúa, J. I. (2008). *ResearchGate*. Recuperado de:  
[https://www.researchgate.net/publication/237782424\\_Water\\_level\\_control\\_system\\_for\\_a\\_low-head\\_run-of-river\\_variable\\_speed\\_small\\_hydropower\\_plant](https://www.researchgate.net/publication/237782424_Water_level_control_system_for_a_low-head_run-of-river_variable_speed_small_hydropower_plant)
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería*. México: Editorial Alfaomega.
- Robayo Espinel, E. M. (2007). *Control Difuso Fundamentos y Aplicaciones*. Barranquilla, Colombia: Editorial Uninorte.
- Rodríguez Penin, A. (2012). *Sistemas SCADA* (3 ed.). Barcelona, España: Alfaomega grupo editor S.A.
- Timothy J. R. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3 ed.). México: Editorial John Wiley & Sons Ltd.
- Sarasúa, J. I., Paz, E., Guillermo Martínez, L., Pérez Díaz, J. I., Román Wilhelmi, J., & Sánchez, J. A. (2014). *ResearchGate*. Recuperado de  
<https://www.researchgate.net/publication/268791543>
- Sotelo León, R. D. (2012). *Control Difuso Para La Estabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia*. México.
- Velasco González, J. (2009). *Energías renovables*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.



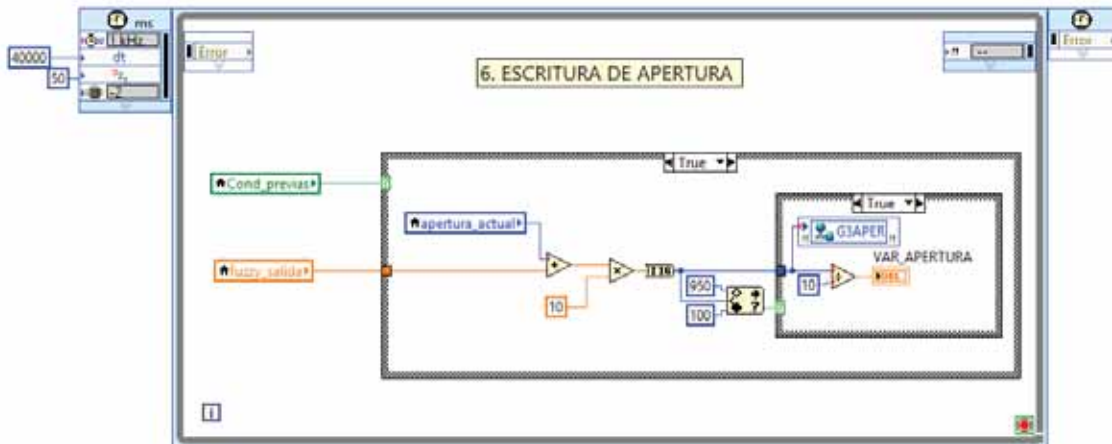
## **ANEXO A**

### **Programa principal del sistema de control difuso implementado en la plataforma de desarrollo LabVIEW 2013**

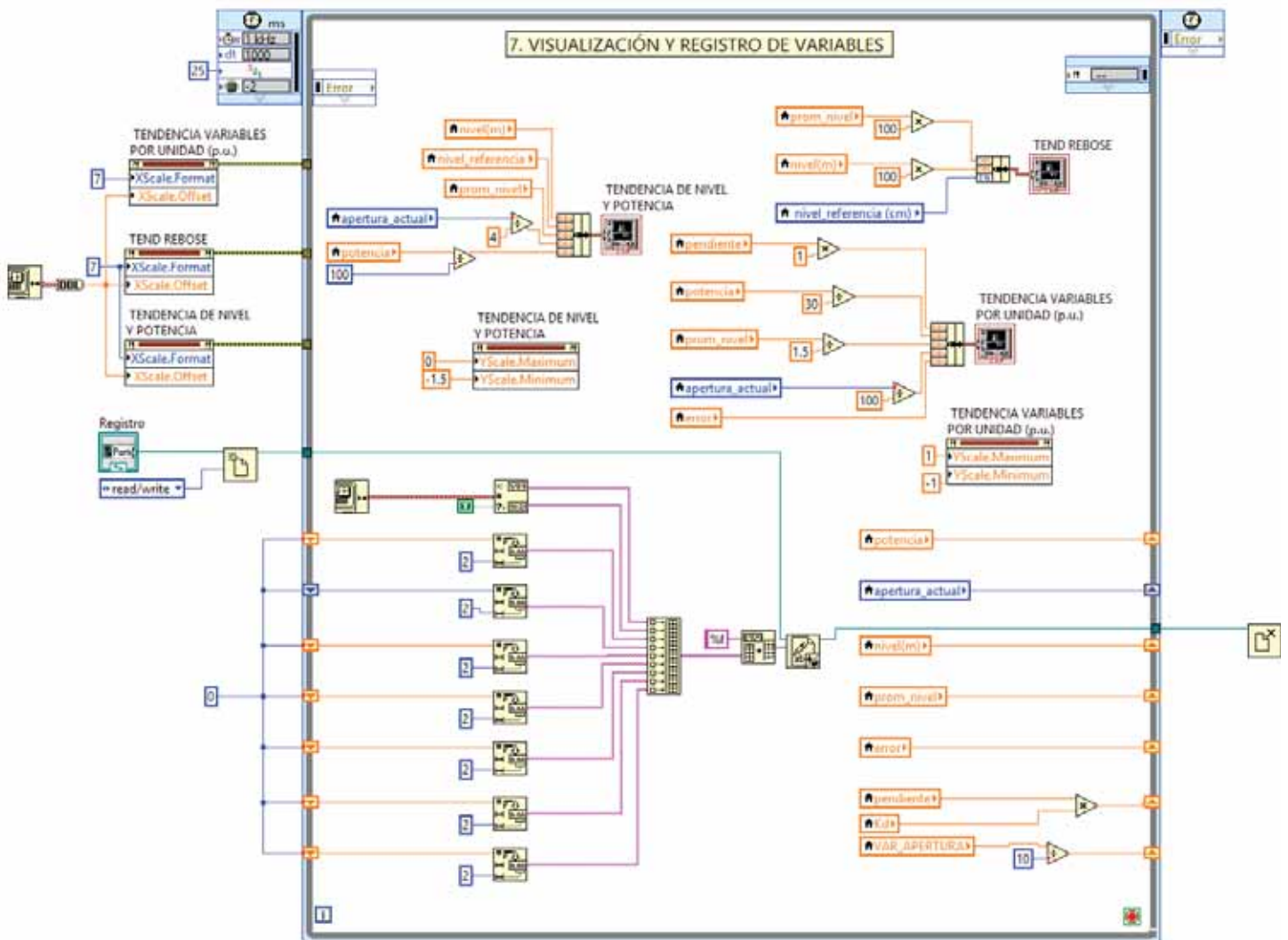
Fuente: Elaboración propia



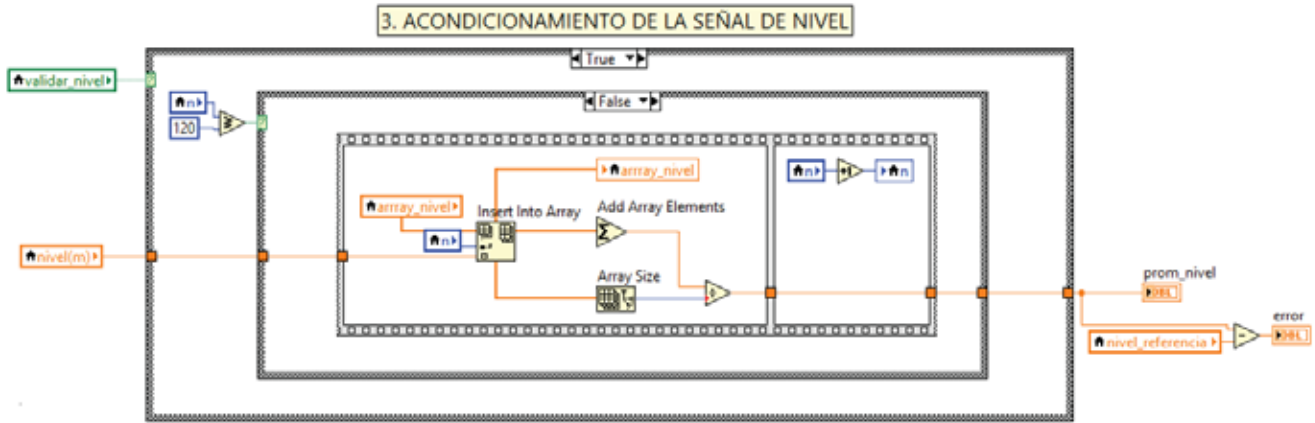
Anexo 1. 1. Programa principal del sistema de control difuso



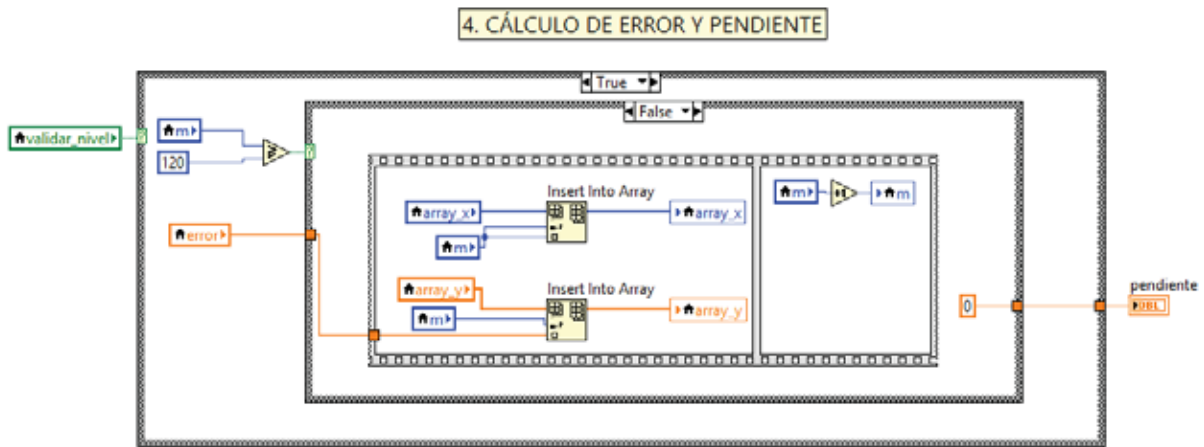
Anexo 1. 2. Sub programa de escritura de apertura de los inyectores de la turbina Pelton.



Anexo 1. 3. Sub programa de visualización y registro de variables.



Anexo 1. 4. Sub programa 3 de controlador difuso caso falso.



Anexo 1-5. Sub programa 4 de controlador difuso caso Falso

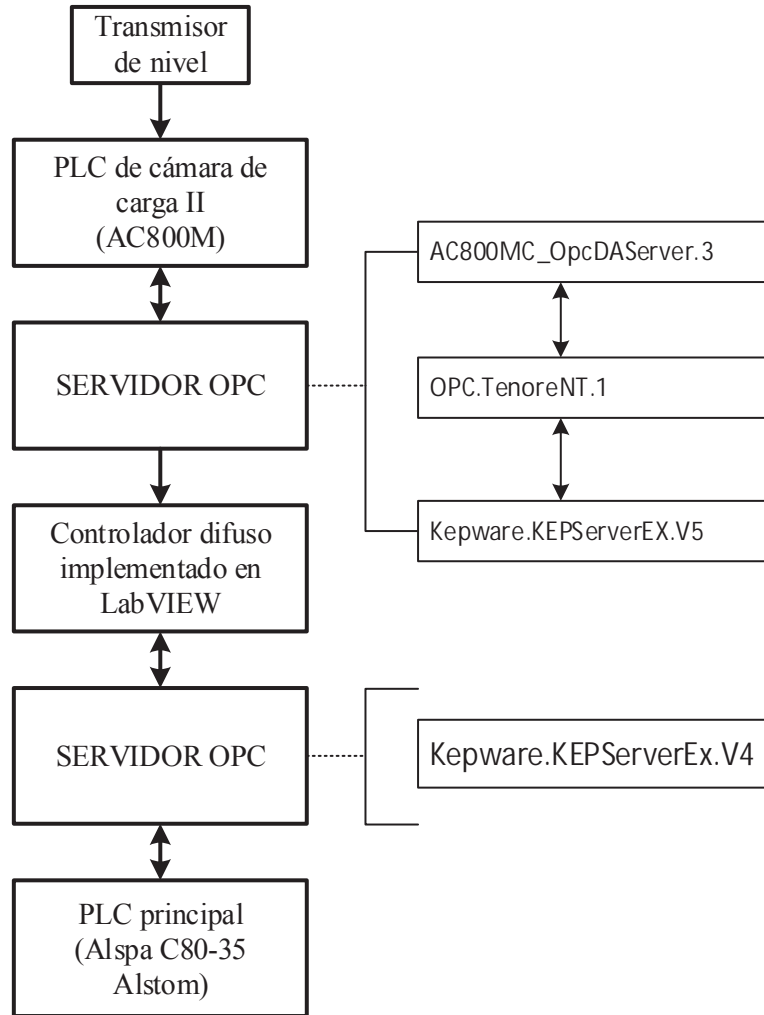
## **ANEXO B**

### **Guía de usuario de la aplicación desarrollado en LabVIEW 2013**

Fuente: Elaboración propia

## Nuevo sistema de control automático de rebose

El esquema de funcionamiento del sistema de control automático de nivel de agua en la cámara de carga II se muestra en el siguiente diagrama de bloques:



*Figura 1. Esquema de funcionamiento del sistema de control automático de rebose*

El programa desarrollado en el programa LabVIEW 2013, en la PC Gateway, ubicado en la sala de control de fase II, obtiene la medición de nivel de agua por medio de conexión OPC del SERVER B del sistema de SCADA fase II. En el programa desarrollado se realiza varios procesamientos de los datos de nivel, con lo cual se determina las consignas de apertura a variar con la finalidad de mantener el nivel de agua en el rango de -40cm al -60cm de rebose de la cámara de carga fase II.

Los valores de consignas determinadas por el programa se envían a uno de los PLCs de los grupos Pelton seleccionado para regulación automática de rebose, a través del nuevo servidor OPC implementado en la PC Gateway. El programa, antes de enviar el porcentaje de apertura, verifica las siguientes condiciones:

- Grupo seleccionado debe estar en modo local
- El porcentaje de apertura determinado por el controlador tiene que estar en el rango de 10% a 95%
- Lectura de nivel de agua sin falla
- Variación de frecuencia dentro de la franja 59.955-60.045Hz, esto para no interferir con la RPF, fuera de ese rango dejara de enviar el porcentaje de apertura.
- Si la potencia del generador es menor que 3MW y mayor a 28MW, el controlador dejara de enviar comandos de apertura. En este caso se debe balancear la carga con los otros grupos para obtener un margen de variación de potencia para la regulación de rebose.
- Conexión OPC sin falla.

### **Pasos para poner en marcha el sistema de control automático de rebose**

Para poder activar el sistema de control automático desde el explorador web en la red Ethernet del sistema PGP, se debe seguir los siguientes pasos:

- 1°. Poner el nivel de mando de grupo en modo LOCAL (en el tablero eléctrico de control).
- 2°. Abrir el explorador web en la PC Workstation PGP, en la sala de control fase II o en el centro de control Dolorespata, seleccionando *Star/All programs/Internet Explorer*.
- 3°. En la pantalla que se muestra, ingresar la siguiente dirección en el campo *Address*:  
<http://172.16.0.151:8000/ControlRebose.html>.

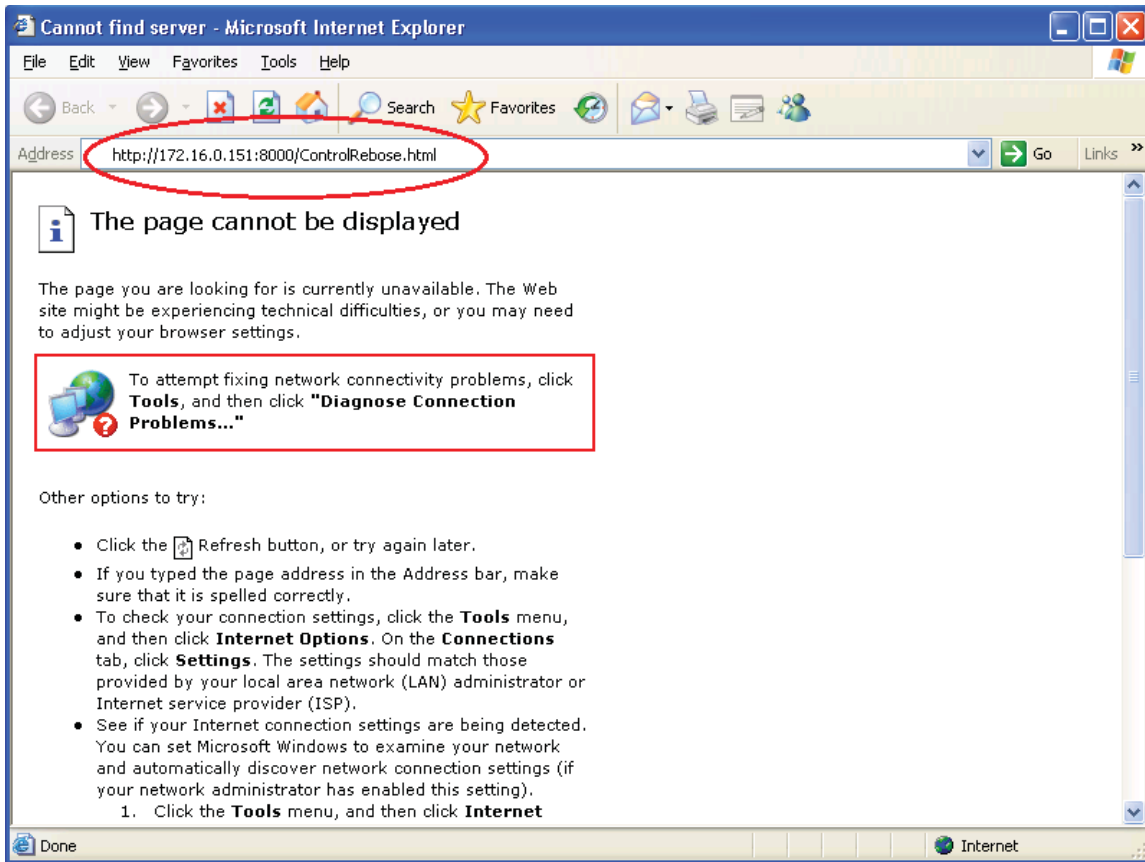


Figura 2. Ingresar la dirección IP del servidor web

4°. Cuando se muestre la siguiente interfaz de usuario, hacer clic derecho en alguna parte de la pantalla y seleccionar *request control of VI*; con lo cual, se solicita el control de VI remoto. Se activarán todos los botones, a partir de ese momento, el operario podrá activar y desactivar el sistema de control automático de nivel de agua. En caso de que el VI no se esté ejecutando, mostrará valor cero en los indicadores de apertura y potencia. Para ejecutar el programa basta con hacer clic en la flecha Run en la parte superior izquierda. Además, tiene la opción de parar la aplicación para poner fuera de servicio el sistema.



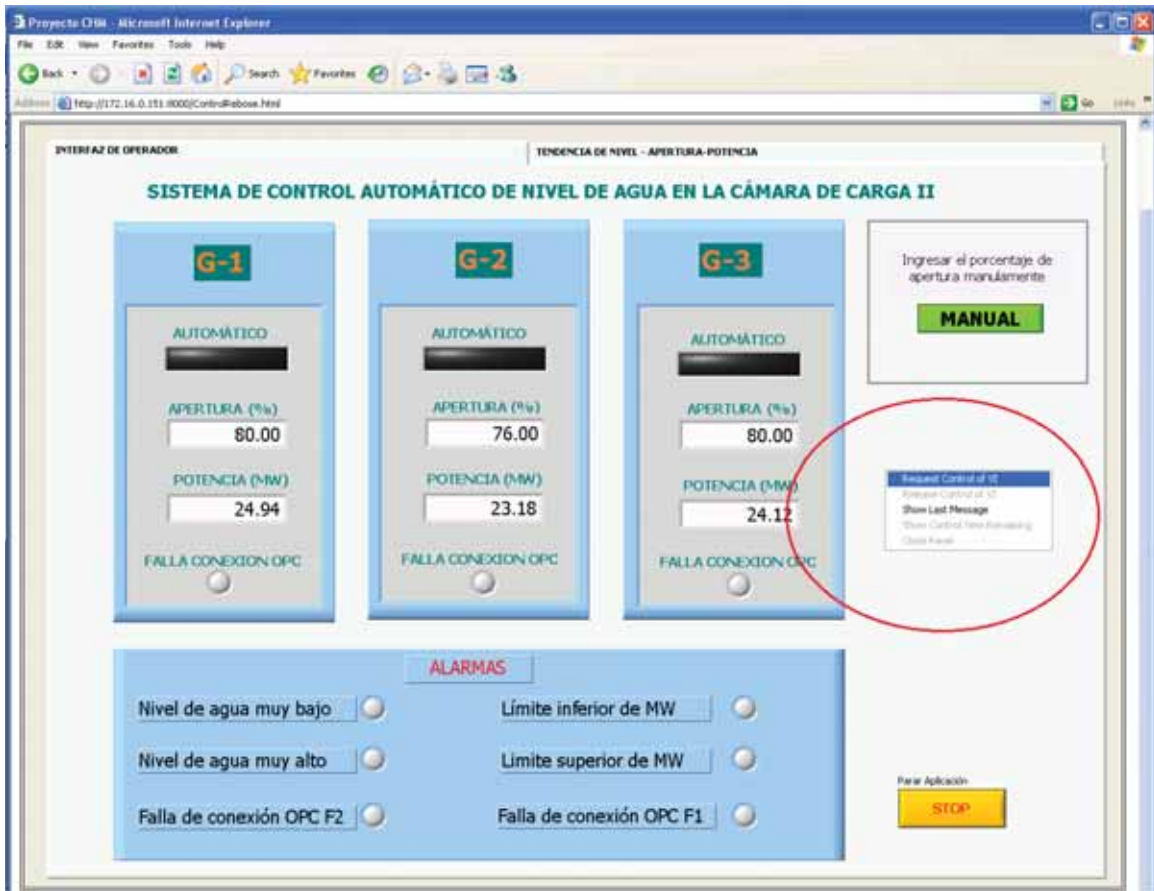


Figura 3. Solicitar control de VI remoto

- 5°. El siguiente paso es seleccionar el grupo para el control de rebose haciendo clic en el número del grupo deseado, en la ventana de diálogo se mostrará dos opciones; hacer clic en el botón **Activar**, con lo cual, se selecciona el grupo para la regulación de rebose.

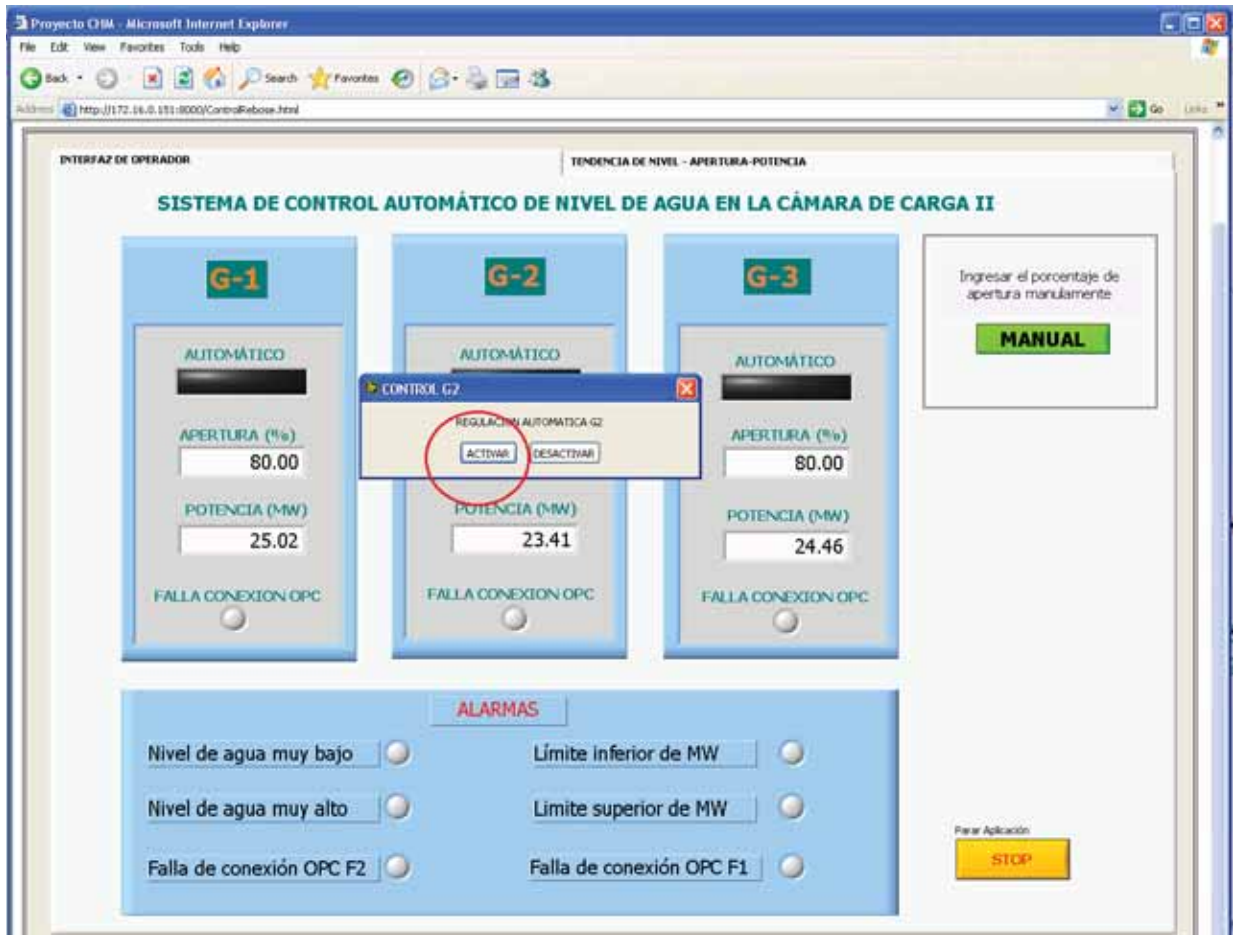


Figura 4. Seleccionar uno de los grupos Pelton

6°. Para cambiar de grupo para la regulación automática de rebose, se debe desactivar el grupo actual y ponerlo en modo remoto. Posteriormente, se tiene que poner en modo LOCAL el nuevo grupo seleccionado. Luego, en el interfaz de usuario repetir el paso 5.

#### **Pasos para poner fuera de servicio al sistema de control automático de rebose.**

Si se desea poner fuera de servicio el sistema por un tiempo, se debe seguir los siguientes pasos.

- 1°. Hacer clic en el nombre del grupo y seleccionar la opción **Desactivar**.
- 2°. Parar la ejecución de la aplicación con el botón STOP.
- 3°. Por último, poner el nivel de mando del grupo en modo REMOTO (en el tablero eléctrico del

grupo).

### Recomendaciones:

- El interfaz de usuario tiene la opción de ajustar el porcentaje de apertura en modo manual, la cual se puede utilizar para balancear las cargas en los grupos Pelton, estando el grupo seleccionado en nivel de mando LOCAL.

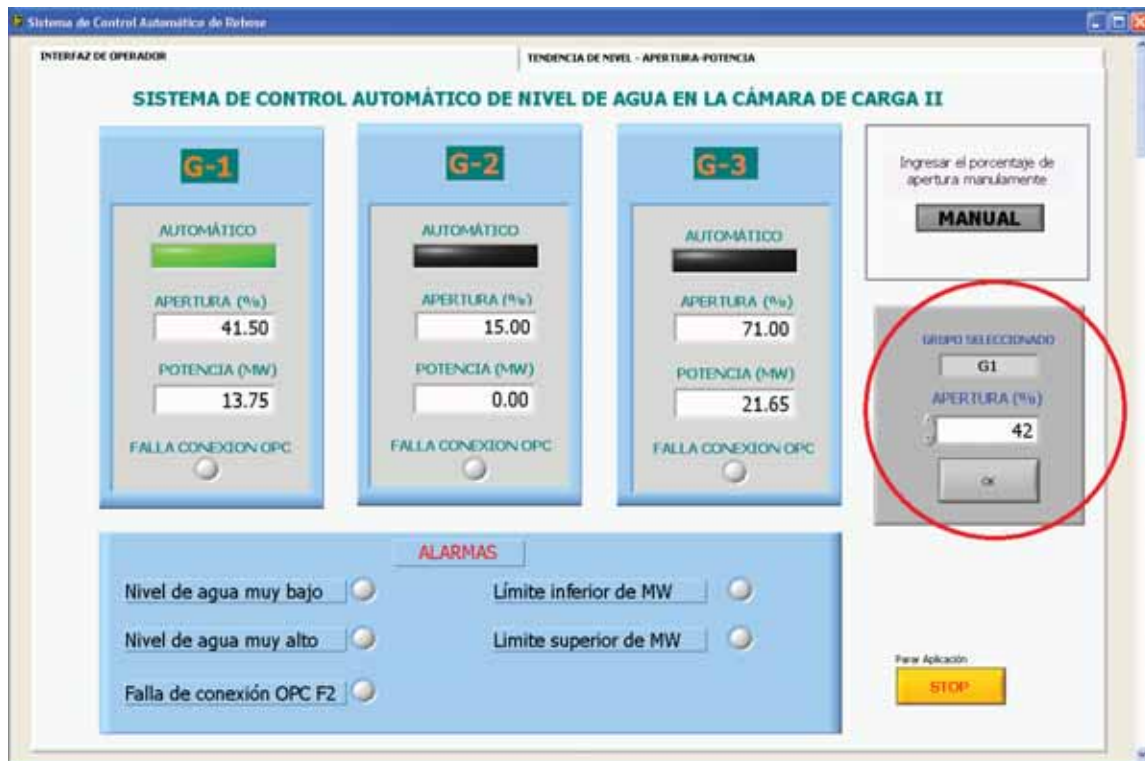


Figura 5. Ventana para ingresar manualmente el porcentaje de apertura.

- Antes de activar el sistema de control automático de reboso, se recomienda poner manualmente el nivel de agua en la cámara de carga en el rango normal, se sugiere en la banda  $-40\text{cm}$  al  $-60\text{cm}$ , esto para evitar cambios bruscos en la potencia con el sistema automático. Esta operación se puede hacer con otro grupo o con el grupo seleccionado utilizando el botón de ajuste manual de apertura de la Figura 1-2.
- Para el proceso de parada o arranque de algún grupo, se sugiere deseleccionar el grupo activo

haciendo clic en el número del grupo, sin parar la ejecución de la aplicación. Una vez terminado con el proceso de parada o arranque, y viendo que el nivel de agua está en la franja normal, se puede activar nuevamente en el grupo anterior o en otro, el sistema de control automático de rebose.

- El botón de ajuste manual de apertura también puede ser usado en caso de que el nivel de agua alcance valores muy bajos, forzando la apertura a un valor determinado por el operario. Cada vez que se use el botón manual se debe cerrar la ventana, para que el programa ejecute en modo automático. Para cerrar esta ventana hacer clic nuevamente en el botón **MANUAL**.

### **Opciones de mejora a futuro**

Observando que la señal de nivel de agua es muy cambiante u oscilatorio en un rango muy amplio, inclusive hasta en 50cm. Se sugiere implementar un arreglo de sensores o transmisores de nivel para tener un valor más confiable de medición de nivel de agua en la cámara de carga I y II.

Tener en cuenta que, cuando la planta está al máximo por encima de 160MW, el nivel de agua en la cámara de carga se vuelve más oscilatorio, debido a la inundación del túnel de aducción y por falta de aireación en el mismo. Por lo cual, el flujo de salida del túnel de aducción es más turbulento. En estos casos se ha visto que es recomendable bajar la carga por unos minutos y luego tomar la misma carga para estabilizar el nivel de agua.

## **ANEXO C**

### **Cálculo de pendiente por regresión lineal**

Fuente: Elaboración propia

### Demostración de la Ecuación 3-10

El objetivo de un modelo de regresión es tratar de explicar la relación que existe entre una variable dependiente (variable respuesta) Y un conjunto de variables independientes (variables explicativas)  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ .

Mediante las técnicas de regresión de una variable Y sobre una variable X, buscamos una función que sea una buena aproximación de una nube de puntos  $(x_i, y_i)$ , mediante una curva del tipo:

$$\hat{Y} = f(X) \quad (1)$$

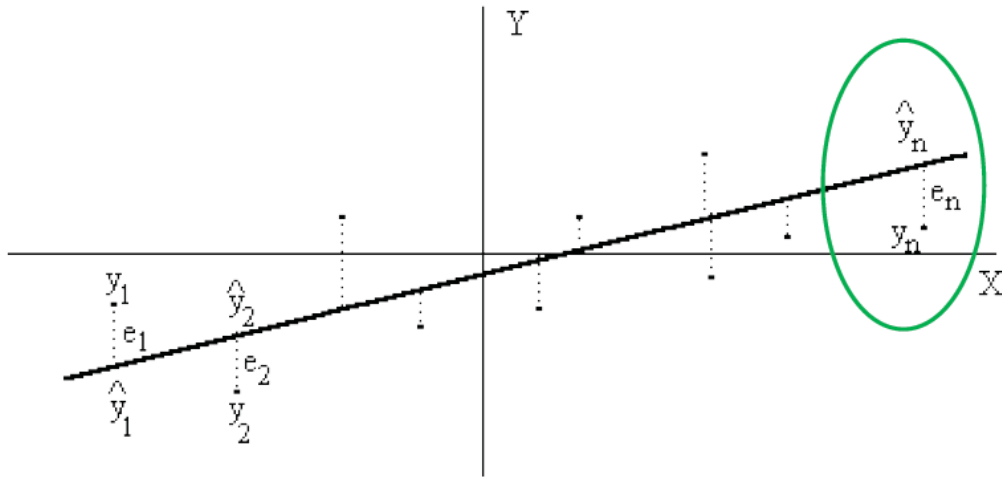


Figura 1. Gráfica de dispersión de muestras

Para hacer una estimación del modelo de regresión lineal simple, se trata de buscar una recta de la forma de la ecuación siguiente, de modo que se ajuste a la nube de puntos:

$$\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}X = a + bX$$
$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (2)$$

Para esto se utiliza el método de mínimos cuadrados. Este método consiste en minimizarla suma de los cuadrados de los errores:

$$\sum_{i=0}^n e_i^2 = \sum_{i=0}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

Afortunadamente no es necesario probar con diferentes rectas cuál de ellas es la que produce el mejor ajuste lineal, ya que es posible encontrar analíticamente las expresiones para a y b. En el caso general en que se tiene n pares de observaciones  $(x_i, y_i)$ , a y b son las soluciones del sistema de ecuaciones (4) y (5).

Reemplazando (2) en (3) y aplicando las derivadas parciales con respecto a y b se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=0}^n (y_i - a - bx_i)^2 = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=0}^n (y_i - a - bx_i)^2 = 0 \quad (5)$$

Resolviendo estas ecuaciones se tiene:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (7)$$

En general, si primero se despeja la “a” en (6), se tiene:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{y} - b\bar{x} \quad (8)$$

Sustituyendo en la ecuación (7), se tiene:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (9)$$

Aplicando las propiedades de sumatorias:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i x_i - \bar{x} y_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x} x_i)}$$

Aplicando propiedades algebraicas (a-b)(c-d) en el numerador y (a-b)<sup>2</sup> en el denominador:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i x_i - \bar{x} y_i - x_i \bar{y} + \bar{x} \bar{y} + x_i \bar{y} - \bar{x} \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - \bar{x} x_i - \bar{x} x_i + \bar{x} x_i + x_i^2 - x_i^2)}$$

Agrupando y factorizando se tiene:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) + (x_i \bar{y} - \bar{x} \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 + (\bar{x} x_i - \bar{x}^2)]}$$

Aplicando la propiedad de sumatoria en el numerador y denominador:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) + \bar{y} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \bar{x} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}$$

Finalmente aplicando la propiedad:  $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = 0$ , se tiene la ecuación reducida, para determinar la pendiente de regresión lineal:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Donde:

$\bar{x}$ : promedio del conjunto de valores independientes

$\bar{y}$ : promedio del conjunto de valores dependientes

a: constante de la ecuación lineal estimado

b: pendiente de la línea de regresión simple



## **ANEXO D**

### **Hoja de datos de los grupos Pelton y Francis**

Fuente: Base de datos COES:

<http://www.coes.org.pe/Portal/FichaTecnica/FichaTecnica/DatosCentralH?id=1203&iFamilia=4>

### **Datos de la Central Hidroeléctrica**

Empresa:	EGEMSA
Central:	C.H MACHUPICCHU
Código:	1203
Número de Unidades de generación:	4
Tipo:	Hidráulico
Potencia efectiva de la central:	168.825MW
Rendimiento:	3.024MW/m <sup>3</sup> /s
Potencia garantizada:	109.997MW

### **Datos de la Turbina G1 (Pelton)**

Código del grupo:	126
Potencia Efectiva:	29.461MW
Potencia nominal:	30.15MW
Potencia nominal aparente:	33.5MVA
Potencia máxima:	29.296MA
Potencia mínima:	3MW
Velocidad de rotación:	450RPM
Caudal mínimo turbinable:	1 m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo turbinable:	11.05 m <sup>3</sup> /s
Rendimiento:	2.860 MW/m <sup>3</sup> /s

### **Datos de la Turbina G2 (Pelton)**

Código del grupo:	127
Potencia Efectiva:	29.461MW
Potencia nominal:	30.15MW
Potencia nominal aparente:	33.5MVA
Potencia máxima:	29.950MW
Potencia mínima:	3MW
Velocidad de rotación:	450RPM
Caudal mínimo turbinable:	1 m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo turbinable:	11.05 m <sup>3</sup> /s
Rendimiento:	2.860 MW/m <sup>3</sup> /s

### **Datos de la Turbina G3 (Pelton)**

Código del grupo:	128
Potencia Efectiva:	17.410MW
Potencia nominal:	30.15MW
Potencia nominal aparente:	33.5MVA
Potencia máxima:	29.55MW
Potencia mínima:	3MW
Velocidad de rotación:	450RPM
Caudal mínimo turbinable:	1 m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo turbinable:	11.05 m <sup>3</sup> /s
Rendimiento:	2.860 MW/m <sup>3</sup> /s

### **Datos de la Turbina G4 (Francis)**

Código del grupo:	128
Potencia Efectiva:	104.492MW
Potencia nominal:	101.85MW
Potencia nominal aparente:	120MVA
Potencia máxima:	99.86MW
Potencia mínima:	40MW
Velocidad de rotación:	450RPM
Caudal mínimo turbinable:	13.5 m <sup>3</sup> /s
Caudal máximo turbinable:	31.0 m <sup>3</sup> /s
Rendimiento:	3.134 MW/m <sup>3</sup> /s

## **ANEXO E**

### **Guía rápida de conexión OPC**

Fuente:

<https://www.kepware.com/getattachment/04042e47-c690-467c-a931-a1ca126575db/Remote-OPC-DA-Quick-Start-Guide-DCOM.pdf>



# Quick Start Guide

---

## Remote OPC DA (DCOM)

July, 2019  
Ref. 03.11

# Table of Contents

1.	Overview .....	1
1.1	What is DCOM?.....	1
1.2	What is OPCEnum? .....	1
2.	Users and Groups.....	1
2.1	Domains and Workgroups.....	1
2.2	Adding a Local User .....	2
2.3	Adding a Local Group .....	3
2.4	Adding Users to a Group.....	3
3.	Server Runtime .....	4
3.1	OPC Connection Security .....	4
3.2	Process Mode .....	5
4.	DCOM Configuration.....	5
4.1	Configuring the Application.....	5
4.2	Configuring the Application Identity (Optional) .....	10
4.3	Configuring the System.....	11
4.4	Applying Changes.....	14
5.	Firewalls .....	14
5.1	What is the Windows Firewall?.....	14
5.2	Server Side Exceptions .....	15
5.3	Client Side Exceptions .....	17
6.	Network Discovery .....	18
7.	Local Security Policies .....	19
7.1	Sharing and Security Model for Local Accounts .....	19
7.2	Let Everyone Permissions Apply to Anonymous Users .....	19
8.	Summary.....	20

# 1. Overview

This document intends to provide information for quickly setting up a secure DCOM connection between an OPC server and a client running on Microsoft Windows XP Service Pack 2 or later.

## 1.1 What is DCOM?

Distributed Component Object Model (DCOM) is an extension of Component Object Model (COM) that allows COM components to communicate among objects on different computers. DCOM uses Remote Procedure Call (RPC) to generate standard packets that can be shared across a network, which in turn allows COM to communicate beyond the boundaries of the local machine.

Because DCOM poses a security threat, care should be taken to not expose more than what is required for the application. Although multiple security layers exist, it is still possible that some part of the system will be compromised.

## 1.2 What is OPCEnum?

The OPC server stores OPC specific information in the registry. Since OPC clients need to be able to discover servers running on both the same machine and remote machines, there needs to be a standard method for accessing this registry information (which is not available for remote access). To do so, a component called OPCEnum is provided by the OPC Foundation. OPCEnum is an executable that is typically installed on a computer along with the OPC server. It runs as a System service and provides a means to browse the local machine for OPC servers and then expose the list to the OPC client.

# 2. Users and Groups

To ensure that an OPC connection is secure, create users and groups that are exclusively for this use. These can be manually added by any user who has the proper credentials to do so.

## 2.1 Domains and Workgroups

When working within a workgroup, each user will need to be created locally on each computer involved in the connection. Furthermore, each user account must have the same password in order for authentication to occur. A blank password is not valid in most cases. Because changes may need to be made to the local security policy on each computer, remote connectivity within a workgroup has the potential to be the least secure connection. For more information, refer to [Local Security Policies](#).

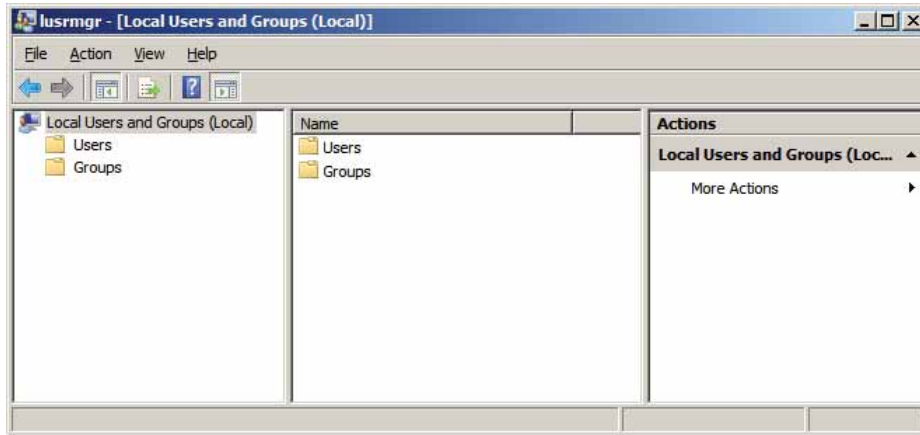
When working within a domain, local users and groups are not required to be added to each computer. A domain uses a central database that contains the user accounts and security information. If working within a domain is preferred, a network administrator may have to implement the changes.

Mixing domains and workgroups will require both computers to authenticate with the lesser of the two options. This means that the domain computer will require the same configuration as it would if it were on a workgroup. Local user accounts must be added to the domain computer.

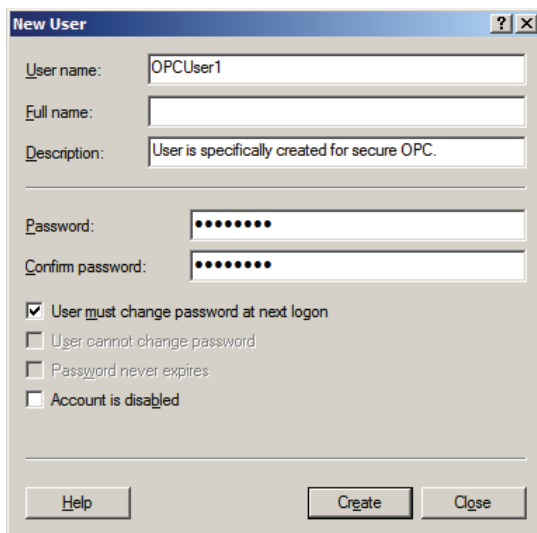


## 2.2 Adding a Local User

1. Launch the **Local User and Groups** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "lusrmgr.msc".



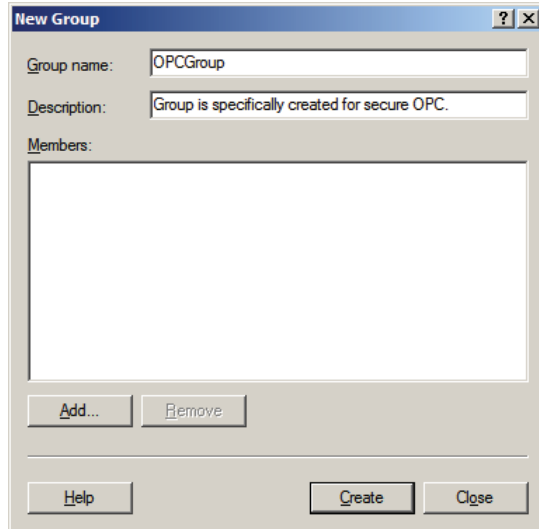
2. Next, click **Users**. Then, select **Action | New User**.



3. Type the appropriate information in the dialog box.
4. Change the following options as required:
  - **User must change password at next logon**
  - **User cannot change password**
  - **Password never expires**
  - **Account is disabled**
5. Click **Create**. Then, click **Close**.

## 2.3 Adding a Local Group

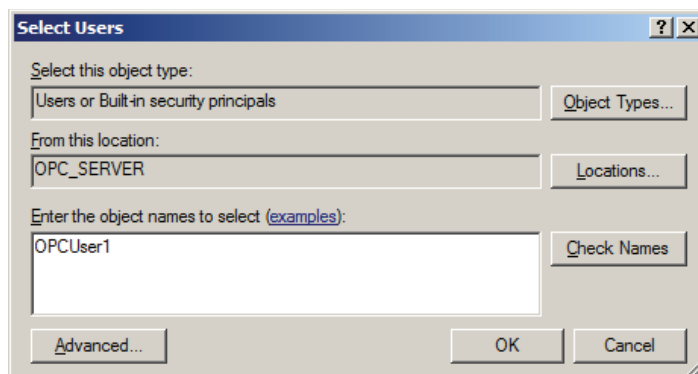
1. Launch the **Local User and Groups** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "lusrmgr.msc".
2. Click **Groups** and then select **Action | New Group**.



3. In **Group name**, type a name for the new group.
4. In **Description**, type a description of the new group.
5. Click **Create** and then click **Close**.

## 2.4 Adding Users to a Group

1. Launch the **Local User and Groups** snap-in.
2. Next, select **Groups**. Then, right-click on the group in which a member will be added and point to **All Tasks**. Click **Add to Group | Add**.



3. In **Object Types**, select the types of objects to find.
4. In **Locations**, click the domain or the computer that contains the users to add. Then, click **OK**.
5. Type the name of the user or group that will be added to the group and then click **OK**. To validate the user or group names being added, click **Check Names**.

## 3. Server Runtime

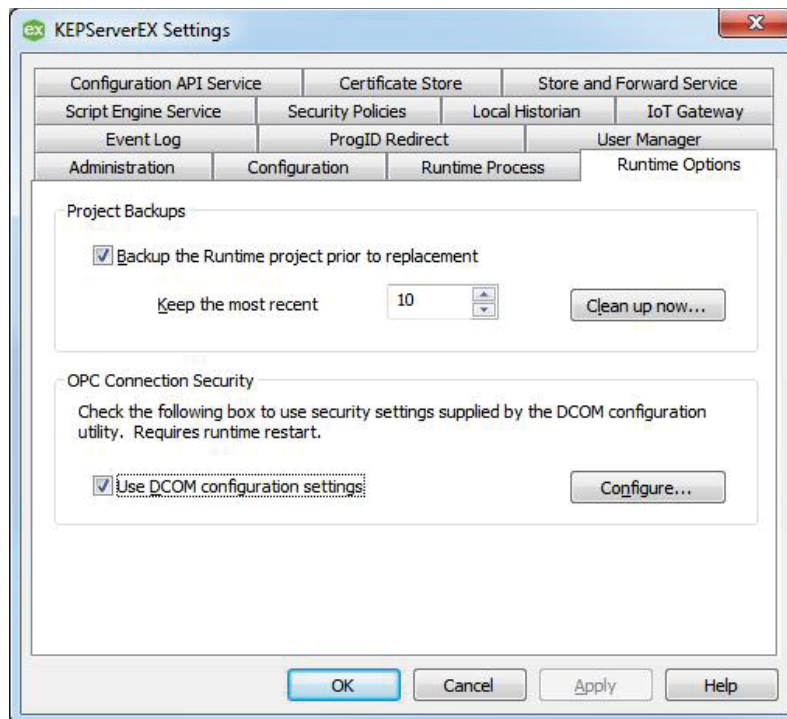
Before DCOM is configured on the server computer, both the level of security and the Runtime's process mode should be considered. To provide the highest level of security, users must enable the appropriate settings. The process mode should be chosen since the DCOM configuration is reset when the process mode is changed.

*For more information on which process mode is appropriate for the specific application, refer to the server's help file.*

### 3.1 OPC Connection Security

To provide the highest level of security, DCOM must be enabled in the Runtime. This option, which is enabled by default, ensures that DCOM settings are obeyed and user authentication is performed. Disabling the option is not recommended since the server will impersonate the security of the client when performing any actions on behalf of the client application.

1. Right-click on the server **Administration** icon in the system tray and then select **Settings**. If the Administration icon is not present, it can be accessed from the **Start** menu.
2. Select the **Runtime Options** tab.
3. Check **Use DCOM configuration utility settings** (if it is not already enabled).



4. Select **Apply** or **OK**.
  - **Note:** If prompted to restart the Runtime, choose **Yes**.

## 3.2 Process Mode

The server Runtime has the ability to run as a service or to run interactively under a user account. By default, the Runtime is installed as a service. In a few cases, however, it may be necessary to change the process mode to allow interactive functionality. For more information on how to switch the process mode, refer to the server's help file.

- **Caution:** Application DCOM settings are reset when the server's process mode is changed.

When remote OPC connections are required, selecting System Service Mode produces the most predictable results. The Runtime is started when the system starts and does not require user intervention. A specific user is not required to be logged on.

Using the Runtime in Interactive Mode may require additional DCOM configuration. The simplest way to authenticate the connection and prevent this additional configuration is to have a DCOM privileged user account logged on to the Windows operating system on both the server and client side. This user account must have the appropriate permissions set in the DCOM settings as described in [DCOM Configuration](#).

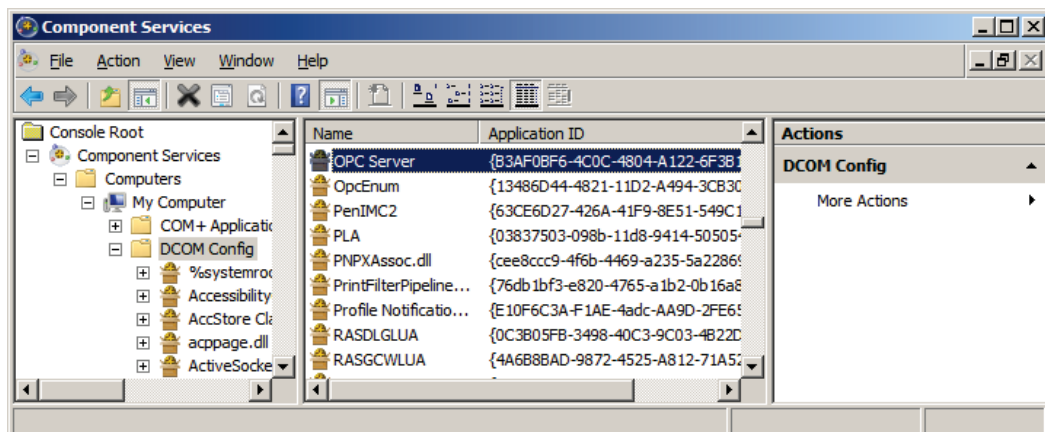
- **Note:** For some situations, extra DCOM configuration is required. For more information, refer to [Configuring the Application Identity \(Optional\)](#).

## 4. DCOM Configuration

The computer running the OPC server must make changes to the application and system levels to setup DCOM correctly.

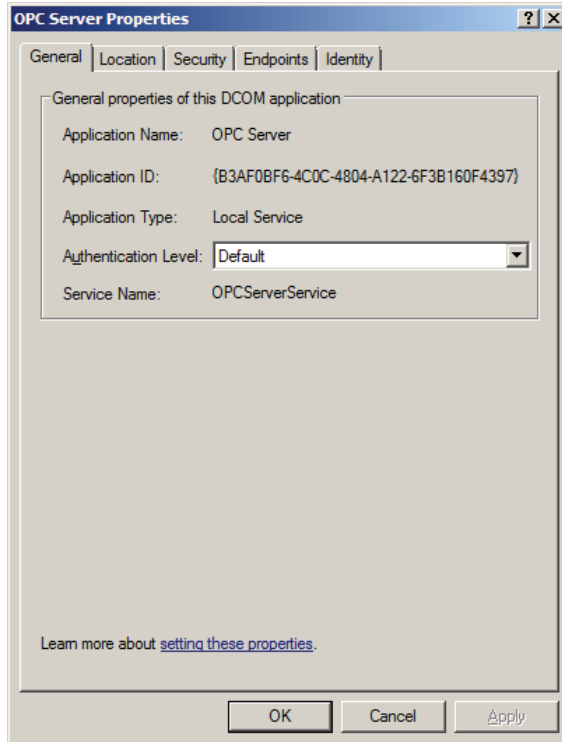
### 4.1 Configuring the Application

1. Launch the **Component Services** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "dcomcnfg".
2. Under **Console Root**, expand **Component Services**, **Computers**, **My Computer** and **DCOM Config**.

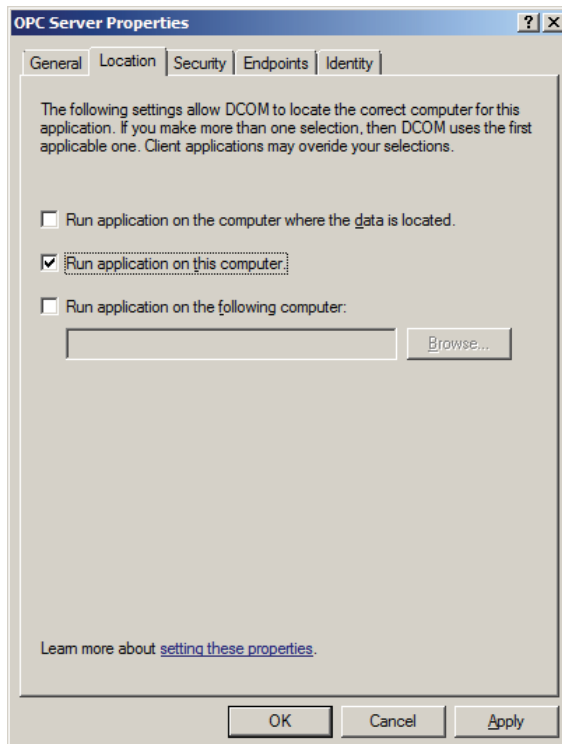


3. Browse the DCOM enabled objects until the OPC server application is located. In this example, "OPC Server" is displayed where the actual application name will appear.
4. Right-click on the server application and select **Properties**.

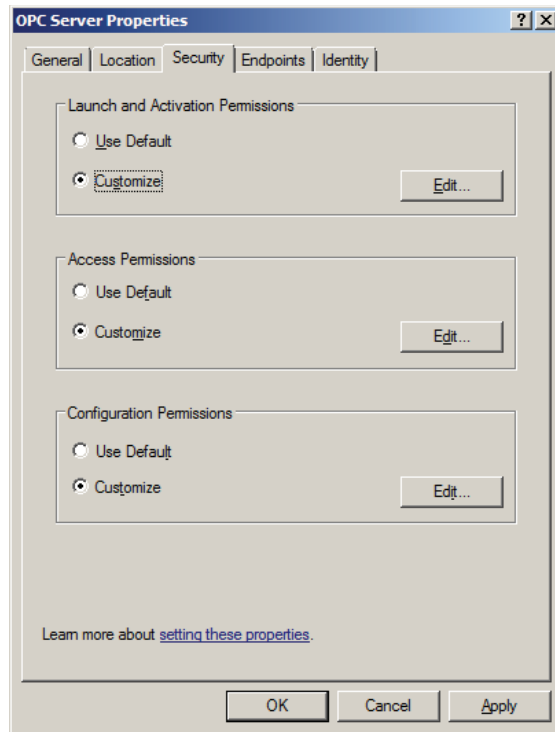
5. Open the **General** tab. Then, verify that the **Authentication Level** is set to **Default**.



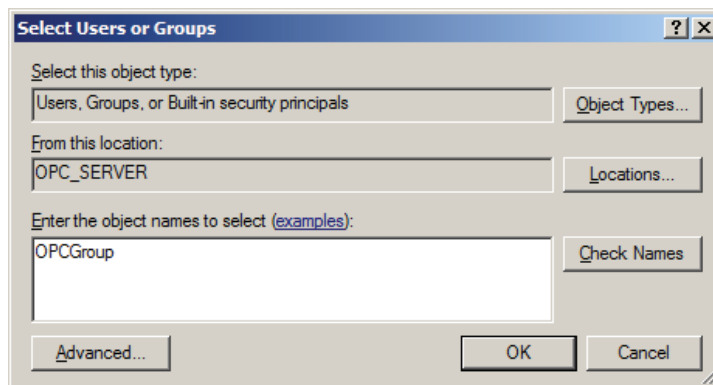
6. Open the **Location** tab.
7. Verify that only the **Run application on this computer** option is enabled.



- Open the **Security** tab.

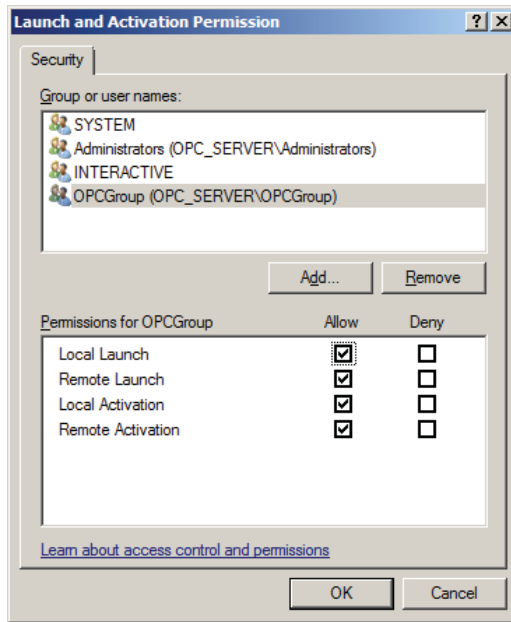


- In **Launch and Activation Permissions**, select **Customize**. Here, users and groups can be granted permission to start the OPC server if it is not already running.
- Click **Edit**.
- In **Launch and Activation Permissions**, select **Add**.



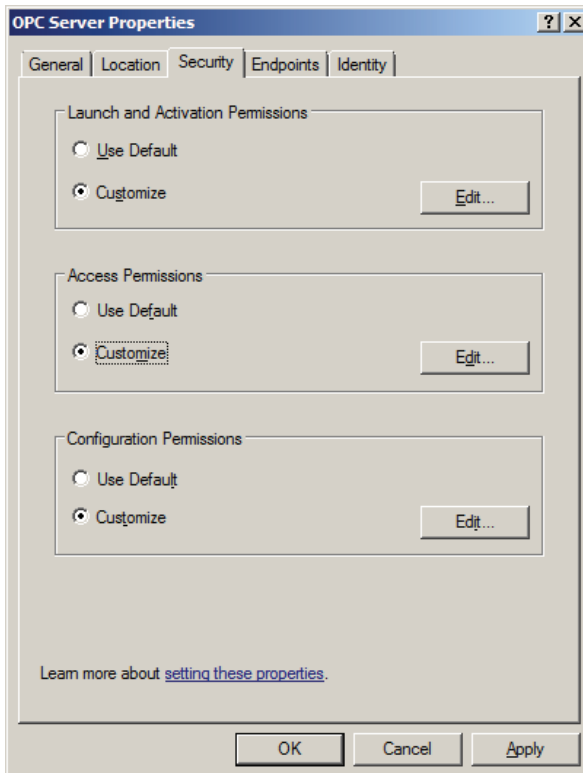
- In **Object Types**, select the desired object type.
- In **Locations**, click the domain or the computer that contains the users or groups that will be added. Then, click **OK**.
- Type the name of the user or group in the window. To validate the user or group names being added, click **Check Names**.
- After the account has been validated, click **OK**.
- Continue to add users and groups until all the desired accounts have been added. The new account or group should be visible in the **Group or user names** list.

17. Next, select the new user or group.



18. To only allow local applications to connect, only enable the local permissions for the account. In this example, local and remote permissions are enabled.

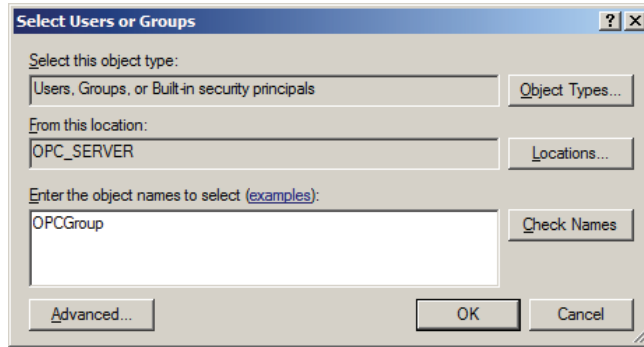
19. Repeat the process for all accounts that have been added. Click **OK**.



20. Select **Customize** in the **Access Permissions** group. Here, users and groups can be granted permissions to make calls to the OPC server. These calls include browsing for items, adding groups and items, or any other standard OPC call.

21. Click **Edit**.

22. In **Access Permissions**, select **Add**.



23. In **Object Types**, select the desired object type.

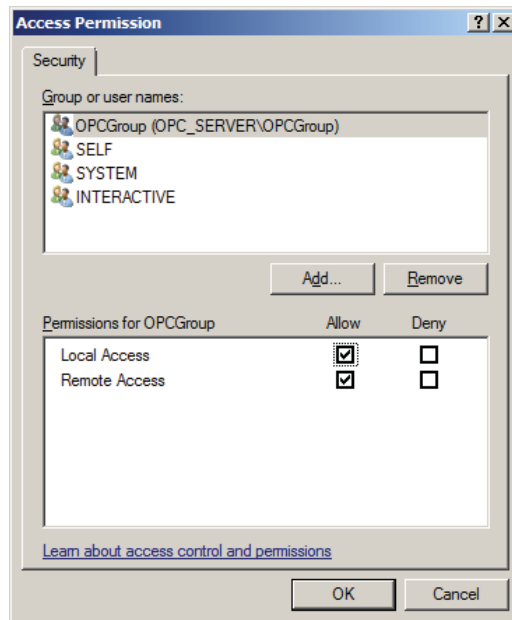
24. In **Locations**, click the domain or the computer that contains the users or groups that will be added. Then, click **OK**.

25. Type the name of the user or group in the window. To validate the user or group names being added, click **Check Names**.

26. After the account has been validated, click **OK**.

27. Continue to add users and groups until all the desired accounts have been added. The new account or group should be visible in the **Group or user names** list.

28. Select the new user or group.



29. To only allow local applications to connect, only enable the local permissions for the account. In this example, local and remote permissions are enabled.

30. Repeat the process for all accounts that have been added. Then, click **OK**.

31. Click **OK** to close the **Application Properties** window.



## 4.2 Configuring the Application Identity (Optional)

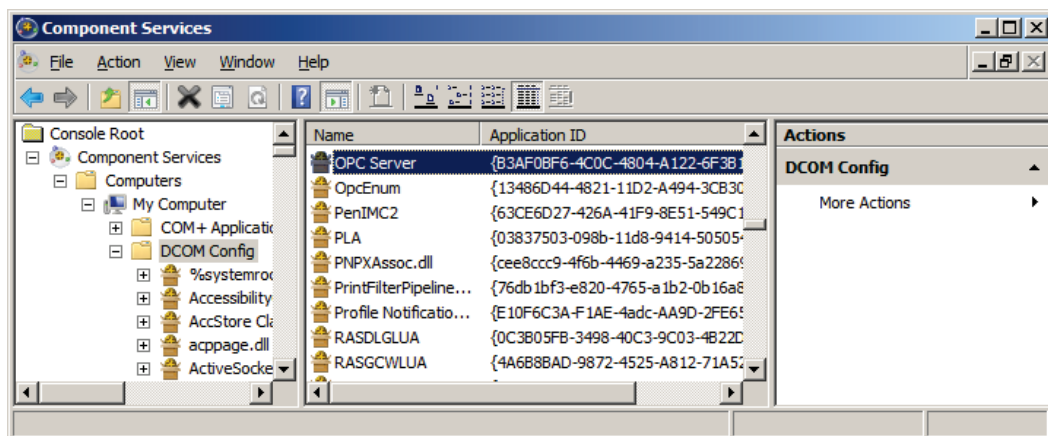
The **Identity** needs to be set when the process mode is set to Interactive and one of the following conditions is present:

- The computer used as the server is required to run with multiple user accounts.
- Users that have not been granted DCOM permissions will be using the computer.

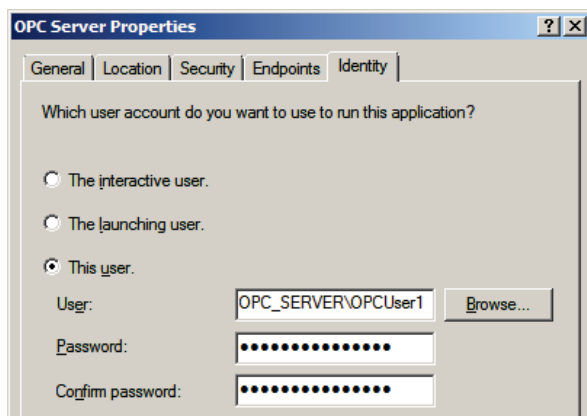
Setting the Identity to **This user** allows a specific user account to be selected to run the application. Clients are then directed to the account allowing a connection to be made to the server. The specified user is not required to be logged on to the Windows operating system in order for this to happen.

◆ **Note:** In this case, the specified user must be part of the Administrators group. If not, the server will not start.

1. Launch the **Component Services** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "dcomcnfg".
2. Under **Console Root**, expand **Component Services, Computers, My Computer** and **DCOM Config**.

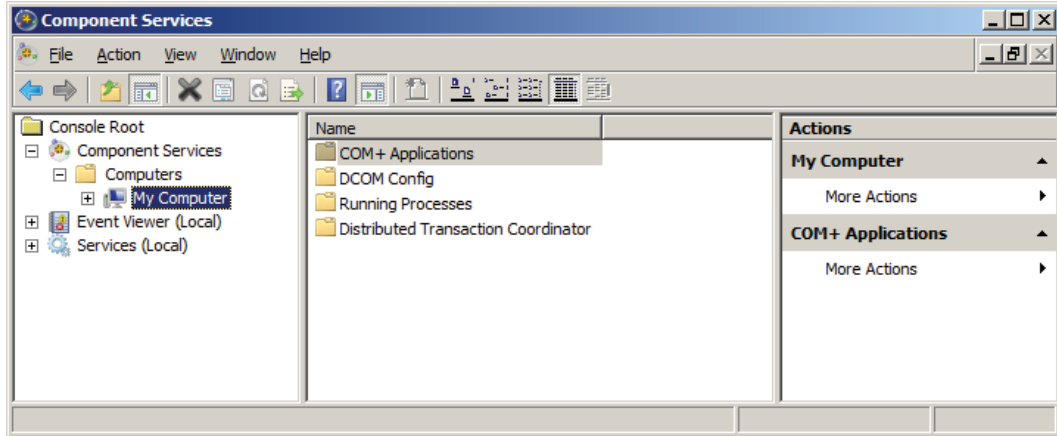


3. Browse the DCOM enabled objects until the OPC server application is located. In this example, "OPC Server" is displayed where the actual application name will appear.
4. Right-click on the server application and then select **Properties**.
5. Next, select the **Identity** tab.
6. Enter the user name or click **Browse** to launch the **Select User** dialog to assist in selecting a valid user name.
7. Enter and confirm the password of the user that has been chosen to run the server application.
8. Select **OK** to close the **Server Properties**.

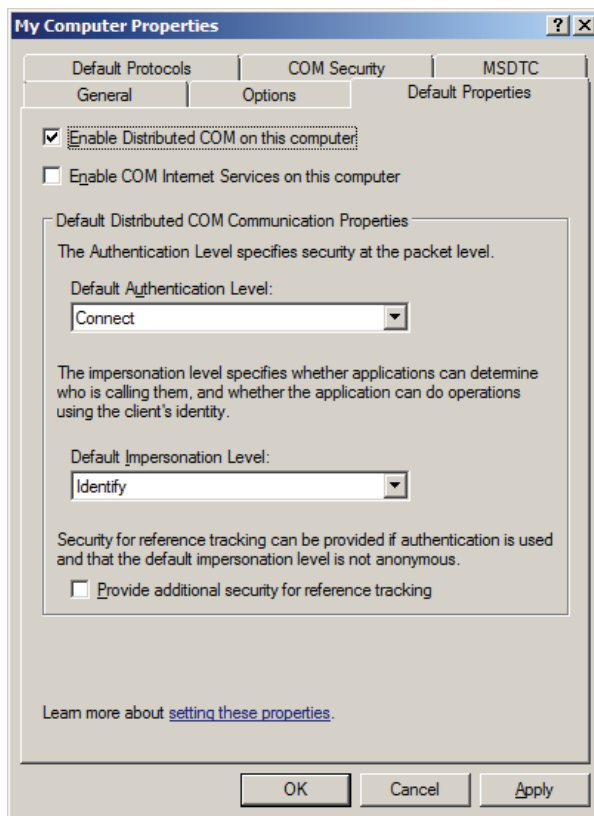


## 4.3 Configuring the System

1. Launch the **Component Services** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "dcomcnfg".
2. Under **Console Root**, expand **Component Services** and **Computers**.

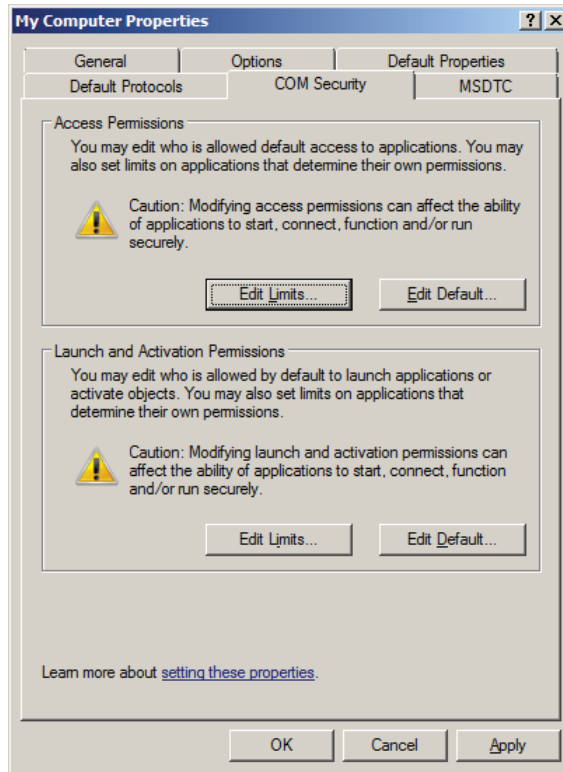


3. Right-click on **My Computer** and then select **Properties**.
4. Next, select the **Default Properties** tab.



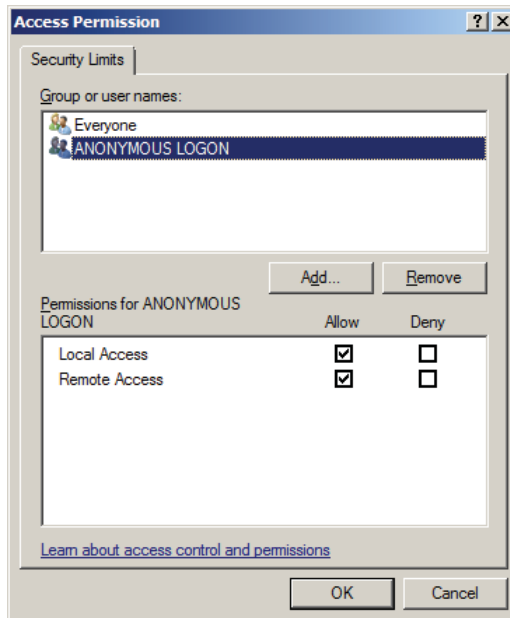
5. Verify that the **Enable Distributed COM on this computer** option is enabled.
6. Select **Connect** for the **Default Authentication Level**.
7. Select **Identify** for the **Default Impersonation Level**.

8. Next, select the **COM Security** tab.



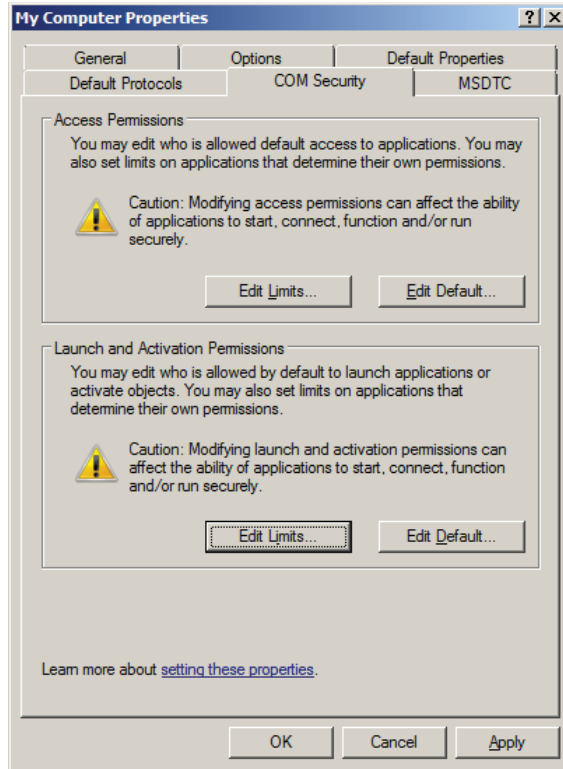
9. Select **Edit Limits** in the **Access Permissions** group.

10. Select the **ANONYMOUS LOGON** group account in the **Group or user names** list.



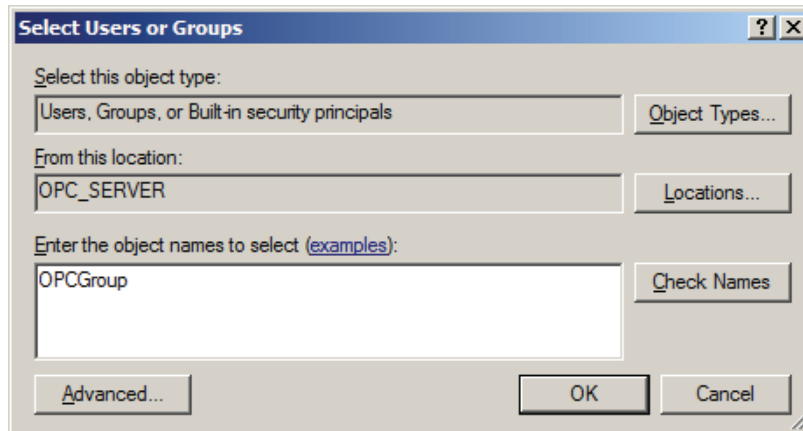
11. Enable the local and remote permissions for this group. OPCEnum overrides DCOM settings and opens accessibility to everyone. In Windows XP Service Pack 2 and above, this step is required because applications are not permitted to perform this action without user interaction.

12. Click **OK** to return to the **COM Security** tab.



13. In the **Launch and Activation Permissions** group, select **Edit Limits**.

14. In **Launch and Activation Permissions**, select **Add**.



15. In **Object Types**, select the desired object type.

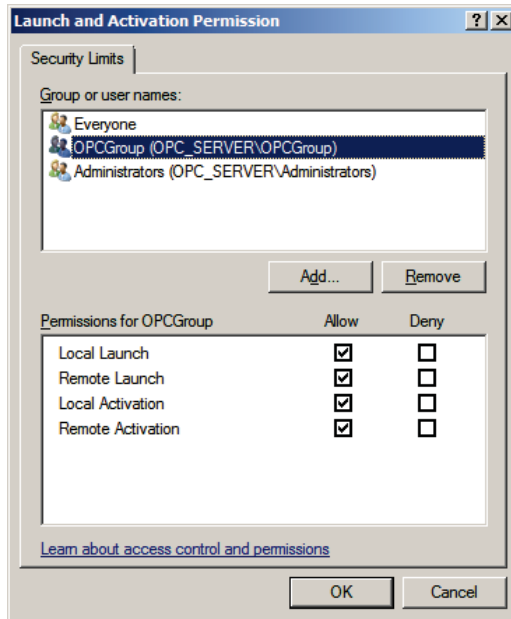
16. In **Locations**, click the domain or the computer that contains the users or groups that will be added. Then, click **OK**.

17. Type the name of the user or group in the window. To validate the user or group names being added, click **Check Names**.

18. After the account has been validated, click **OK**.

19. Continue to add users and groups until all the desired accounts have been added. The new account or group should be visible in the **Group or user names** list.

20. Next, select the new user or group.



21. To only allow local applications to connect, only enable the local permissions for the account. In this example, local and remote permissions are enabled.

22. Repeat the process for all accounts that have been added. Then, click **OK**.

23. Click **OK** to close the **My Computer** properties window.

## 4.4 Applying Changes

After the DCOM settings have been modified, the changes made may not be applied immediately. While some operating systems require a reboot for DCOM changes to take effect, others will only require restarting the Runtime. To do so, right-click on the **Administration** icon in the **System Tray** and then select **Stop Runtime**. Once the Runtime has stopped, the **Start Runtime** menu item will be enabled and ready for selection.

## 5. Firewalls

In some cases, it is easier to turn off any firewalls that may be running on both the client and server machine before DCOM is setup. Once a connection has been successfully created, it is recommended that the firewall security is restored and the correct exceptions are added.

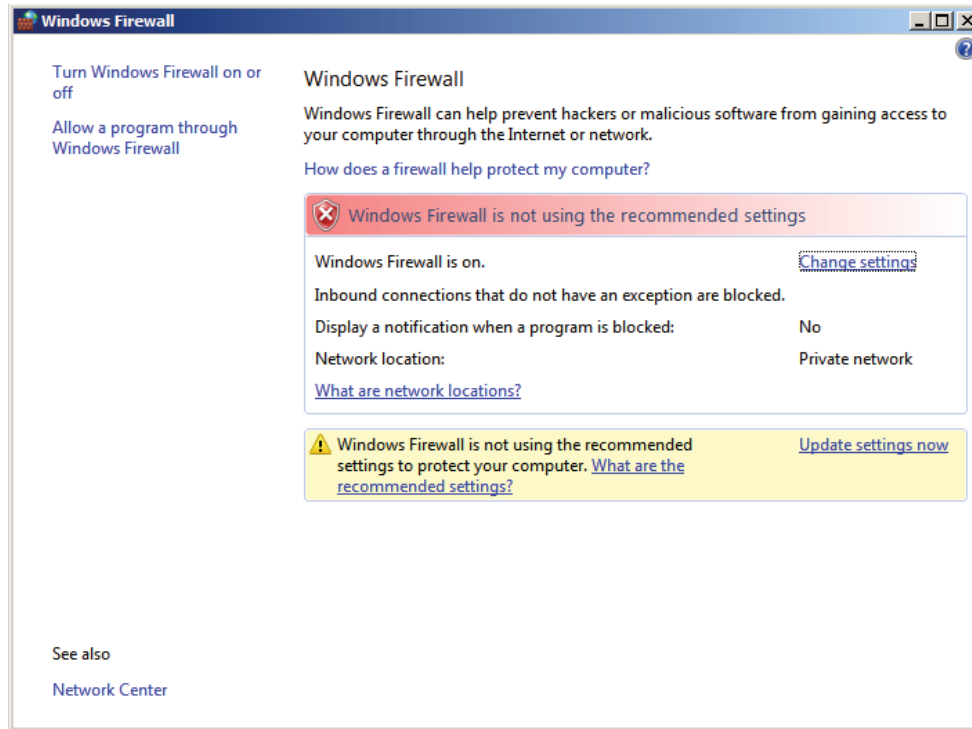
### 5.1 What is the Windows Firewall?

The Windows Firewall is the firewall service included with desktop and server releases of Microsoft Windows. Prior to Windows XP Service Pack 2, it was named "Internet Connection Firewall." Its purpose is to drop incoming traffic that is not expected (unsolicited traffic) or traffic that does not correspond to the exceptions (excepted traffic) that are set within the firewall.

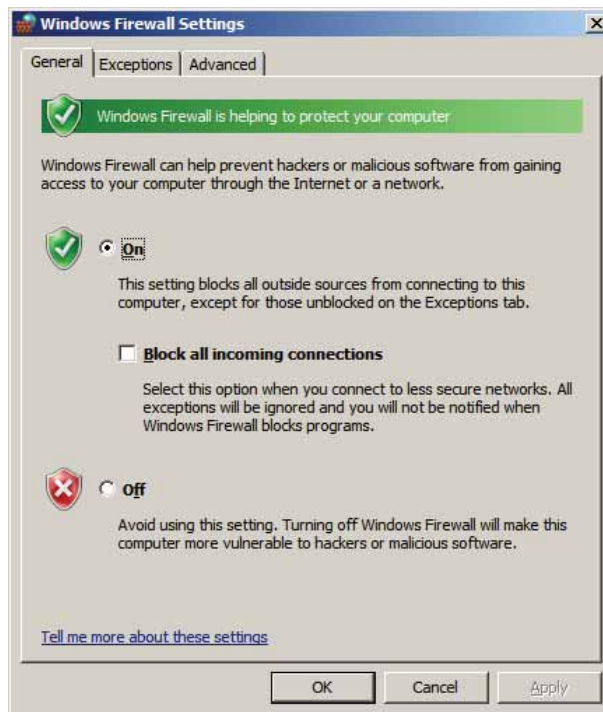
● **Note:** Aside from the server computer, the firewall must also be set on client computer so that callbacks can be received.

## 5.2 Server Side Exceptions

1. Launch the **Windows Firewall** by selecting **Start | Run** and then typing "firewall.cpl".

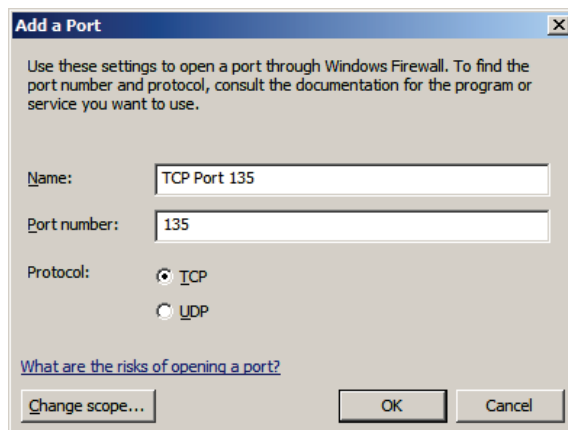


2. Windows Vista or Windows Server 2008 will not directly display the settings dialog. To view the dialog, select **Change Settings**.
3. Next, select the **General** tab.

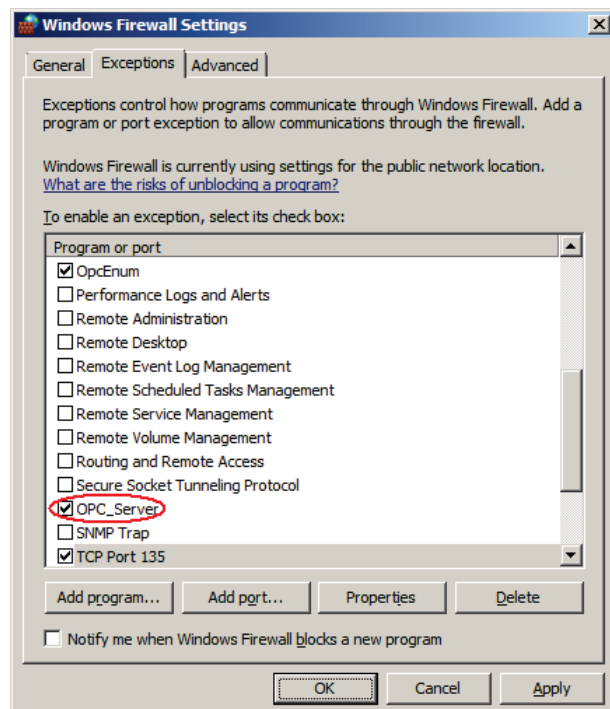


4. Verify that the firewall is enabled by choosing **On**.

5. Select the **Exceptions** tab.
6. Click **Add program**.
7. Click **Browse** and then locate **OPCEnum.exe**. This is located in *C:\Windows\System32\*.
8. Click **OK**.
9. Click **Add program**.
10. Next, select **Browse** and then locate the OPC server application's executable file. This is usually located in *C:\Program Files\<company name>\<product name>\* or in *C:\Program Files\product name\*.
  - **Note:** In this example, a generic server name of "OPC\_Server.exe" is used to apply to any OPC server's configuration.
11. Click **OK**.
12. Click **Add port**.

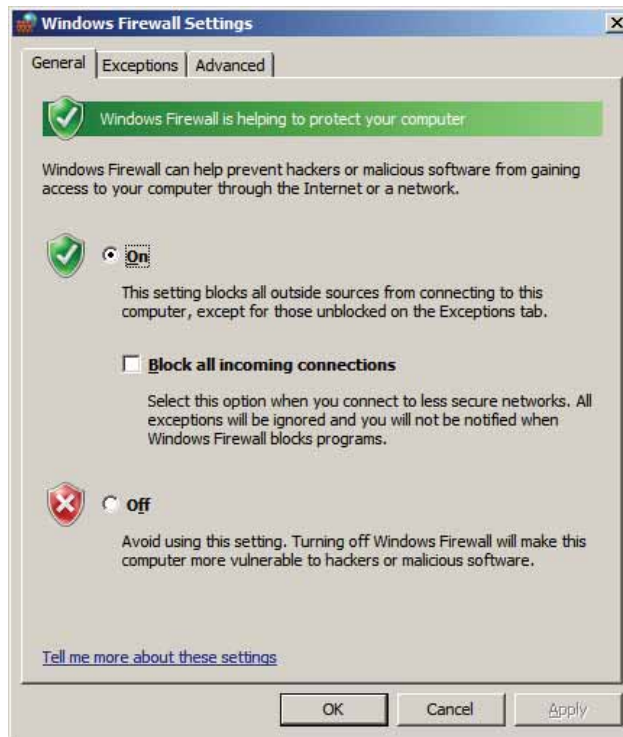


13. In **Name**, enter **TCP Port 135**. This port is commonly used for allowing clients to discover and utilize a DCOM service.
14. In **Port number**, enter **135**.
15. Verify that the correct **Protocol** is selected. The default is **TCP**.
16. Click **OK**.
17. Click **OK** to close the settings dialog.

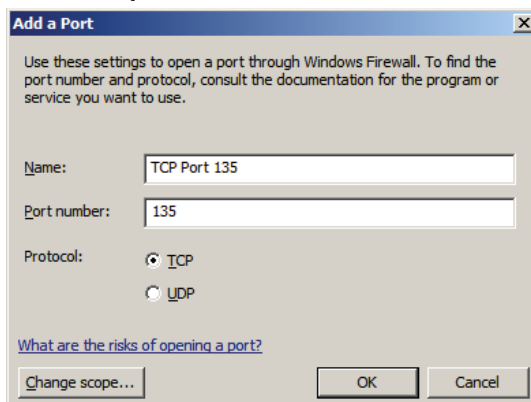


### 5.3 Client Side Exceptions

1. Windows Vista or Windows Server 2008 will not directly display the settings dialog. To view the dialog, select **Change Settings**.
2. Select the **General** tab.



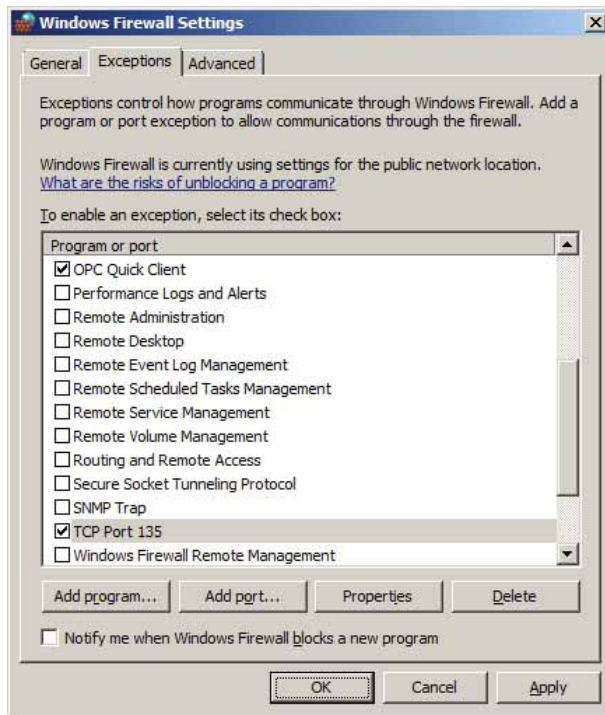
3. Verify that the firewall is enabled by choosing **On**.
4. Select the **Exceptions** tab.
5. Click **Add program**.
6. Click **Browse** and locate the server application's executable file. In this example, the OPC Quick Client is used and is usually located in *C:\Program Files\<company name>\<product name>\*.
7. Click **OK**.
8. Click **Add port**.



9. In **Name**, enter **TCP Port 135**.
10. In **Port number**, enter **135**.



11. Verify that the correct **Protocol** is selected. The default is **TCP**.
12. Click **OK**.

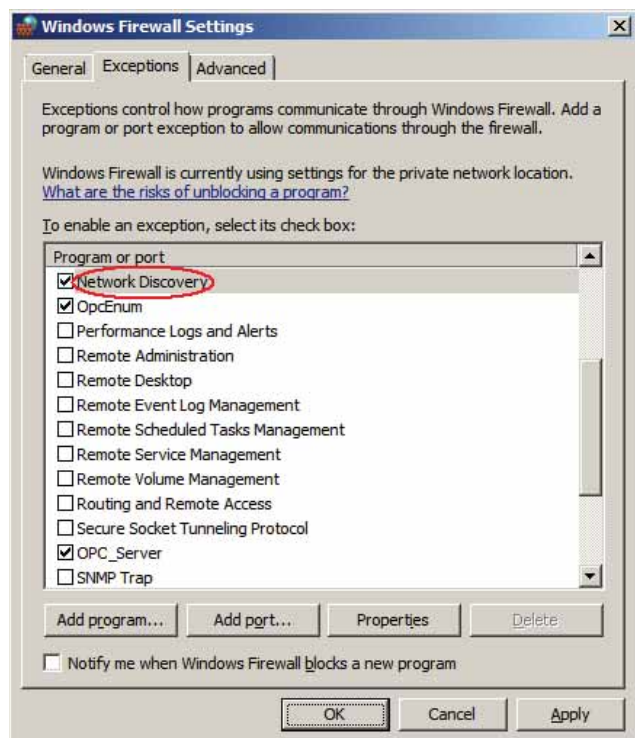


13. Click **OK** to close the settings dialog.

## 6. Network Discovery

The **Network Discovery** setting was first introduced in Windows Vista and allows or prevents the computer to detect or be detected by other computers on the network. If the setting is off (or if it is not set as an exception in the firewall) OPC clients might not be able to browse for the server.

1. Click **Start | Control Panel | Network and Sharing Center**.
2. Under the **Sharing and Discovery** section, click the **Down Arrow** in the **Network Discovery** row.
3. Click the **Turn on network discovery** radio button, and then click **Apply**.



4. If the state of **Network Discovery** displays **Custom**, it is because the firewall is not allowing for network discovery or because a required service (**dnscache**, **fdrespub**, **ssdpsrv**, and **upnphost**) is not running. While not all services are necessary, the firewall must be set correctly.
5. Launch the **Windows Firewall** and view the settings dialog.
6. Search for **Network Discovery** in the list and then verify that the exception is enabled.
7. Click **OK** to close the **Settings** dialog.

## 7. Local Security Policies

When the computers that are involved in the remote connection are part of a workgroup, it may be necessary to edit the **Local Security Policy**. This can pose as a security risk and should only be done if it is absolutely necessary. In most cases, the server computer may require changes to the authentication model whereas the client computer needs to have access to browse for servers.

### 7.1 Sharing and Security Model for Local Accounts

This setting determines how local users will be authenticated. When the setting is set to **Classic**, remote logons will use the same level of access that is set for the local account given that it has the same username and password. If set to **Guest only**, network logons will use the same level of access that is set for the **Guest** account.

The **Sharing and Security Model** may need to be set to **Classic** on the server computer only. An error code (HR=80070005) will be returned to the client when attempting to add items if this is required.

1. Launch the **Local Security Policy** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "secpol.msc".
2. Under **Security Settings**, expand **Local Policies**.
3. Next, select **Security Options**.
4. In the list, right-click on **Network access: Sharing and security model for local accounts** and then select **Properties**.
5. Choose **Classic – local users authenticate as themselves** and then click **OK**.

### 7.2 Let Everyone Permissions Apply to Anonymous Users

This setting determines the additional permissions that are granted for anonymous logons. When the option is disabled, the permissions granted to the Everyone security identifier do not apply to anonymous users. If the option is enabled, anonymous users are given the same permissions as the Everyone group.

The **Everyone Permissions** setting needs to be enabled on the client computer only. If clients cannot browse for the remote server even after DCOM has been set up, this setting is required.

1. Launch the **Local Security Policy** snap-in, which is part of the **Microsoft Management Console**. It can be viewed directly by selecting **Start | Run** and then typing "secpol.msc".
2. Under **Security Settings**, expand **Local Policies**.
3. Select **Security Options**.
4. In the list, right-click on **Network access: Let Everyone permissions apply to anonymous users** and then select **Properties**.
5. Choose **Enable** and then select **OK**.

## 8. Summary

Because OPC uses DCOM to allow remote communications, it is imperative that it is correctly configured. Users can create a secure connection by following the instructions in this document. For more information, refer to the OPC Foundation's support documentation at <http://www.opcfoundation.org/>.

## **ANEXO F**

### **Hoja de datos del transmisor de nivel SITRANS Probe LU**

Fuente:

[http://82.223.110.163/Catalog/documents//20131120123842\\_8488\\_7\\_Hojas\\_tecnicas\\_Probe\\_LU\\_LS.pdf](http://82.223.110.163/Catalog/documents//20131120123842_8488_7_Hojas_tecnicas_Probe_LU_LS.pdf)

## Sinopsis



El SITRANS Probe LU es un transmisor de nivel alimentado por bucle de 2 hilos. Usa la tecnología ultrasónica para proporcionar mediciones de nivel, volumen y caudal de líquidos en tanques de almacenamiento y tratamiento primarios, y en canales abiertos.

## Beneficios

- Medición continua de nivel, rango máximo 12 m (40 ft)
- Fácil de instalar y configurar
- Programación sencilla con programador manual de infrarrojos de seguridad intrínseca, SIMATIC PDM o HART®
- Compatible con el protocolo HART
- Sensores de ETFE o PVDF para compatibilidad química
- Patentada tecnología de procesamiento de señal Sonic Intelligence
- Elevada relación señal/ruido
- Supresión automática de falsos ecos provenientes de obstrucciones

## Gama de aplicación

El SITRANS Probe LU le ofrece una solución ideal para aplicaciones de abastecimiento y tratamiento de aguas y el almacenamiento de productos químicos.

El SITRANS Probe LU permite monitorizar niveles en rangos de 6 - 12 metros (20 - 40 ft). Una característica especial del transmisor es la supresión automática de falsos ecos provenientes de obstrucciones. Con la elevada relación señal/ruido se obtiene una precisión de 0,15% del rango, o 6 mm (0,25"). El resultado es mayor precisión y fiabilidad.

El SITRANS Probe LU constituye el perfeccionamiento del modelo premiado Milltronics Probe. Combina el sofisticado software de procesamiento Sonic Intelligence®, nuevas técnicas de procesamiento de señal, microprocesador y comunicaciones de última generación.

Con SITRANS Probe LU, dispone de transductores de ETFE o PVDF que se seleccionan en base a la compatibilidad química. El Probe LU incorpora un sensor de temperatura para compensar variaciones de temperatura en la aplicación (material y proceso).

## Datos técnicos

### Modo de operación

Principio de medida	Medida ultrasónica de nivel
Aplicaciones comunes	medida de nivel en tanques de almacenamiento y tratamiento primario

### Entradas

Rango de medición	
modelo 6 m (20 ft)	0,25 a 6 m (10" a 20 ft)
modelo 12 m (40 ft)	0,25 a 12 m (10" a 40 ft)
Frecuencia	54 KHz

### Salidas

mA	
• salida analógica	4 a 20 mA
• precisión	± 0,02 mA
• span	proporcional o inversamente proporcional

### Rendimiento

Resolución	≤ 3 mm (0,12")
Precisión de medida	± 0,15% del rango ó 6 mm (0,25"), se aplica el valor más alto
Repetibilidad	≤ 3 mm (0,12")
Zona muerta	0,25 m (10")
Tiempo de actualización (4 mA)	≤ 5 segundos
Compensación de temperatura	integrada, para compensar variaciones de temperatura
Ángulo de haz	10°

### Condiciones de aplicación

• Condiciones ambientales	
- Ubicación	Apto para montaje interior/a prueba de intemperie
- Temperatura ambiente	-40 a +80 °C (-5 a +176 °F)
- Humedad relativa	A prueba de intemperie
- Categoría de instalación	I
- Grado de contaminación	4
• Condiciones de funcionamiento	
- Temperatura (brida/rosca)	-40 a +85 °C (-5 a +185 °F)
- Presión (depósito)	atmosférica

### Construcción

Material (caja)	PBT (politereftalato de butileno)
Grado de protección	Caja Tipo 4X/NEMA 4X, Tipo 6/NEMA 6/IP67/IP68
Peso	2,1 kg (4,6 lbs)
Entrada de cables	2 x prensa estopas M20x1,5 o 2 x rosca ½" NPT
Sensor (2 opciones)	ETFE (etileno tetrafluoretileno) o PVDF (fluoruro de polivinilideno)
Conexión al proceso	
• conexión roscada	2" NPT, BSP, o G/PF
• brida de unión	brida universal 3" (80 mm)
• otras conexiones	Soporte de montaje FMS 200 o soporte proporcionado por el cliente

---

**Indicación y manejo**

Interfaz	HART: estándar, integrado (salida analógica)
Configuración	Mediante Siemens SIMATIC PDM (PC), un comunicador portátil HART, o programador manual de infrarrojos Milltronics
Memoria	EEPROM (no volátil), no se precisa pila de respaldo
Programador (teclado infrarrojos opcional)	
• aprobaciones	ATEX II 1 G, EEx ia IIC T4 CSA y FM Clase 1, Div. 1, Gr. A,B,C,D, T6 a la máx. temperatura ambiente
• temperatura ambiente	-20 a +40 °C (-5 a +104 °F)
• interfaz	señal de infrarrojos (diseño exclusivo)
• alimentación eléctrica	pila de litio 3 V (no sustituible)

---

**Alimentación eléctrica**

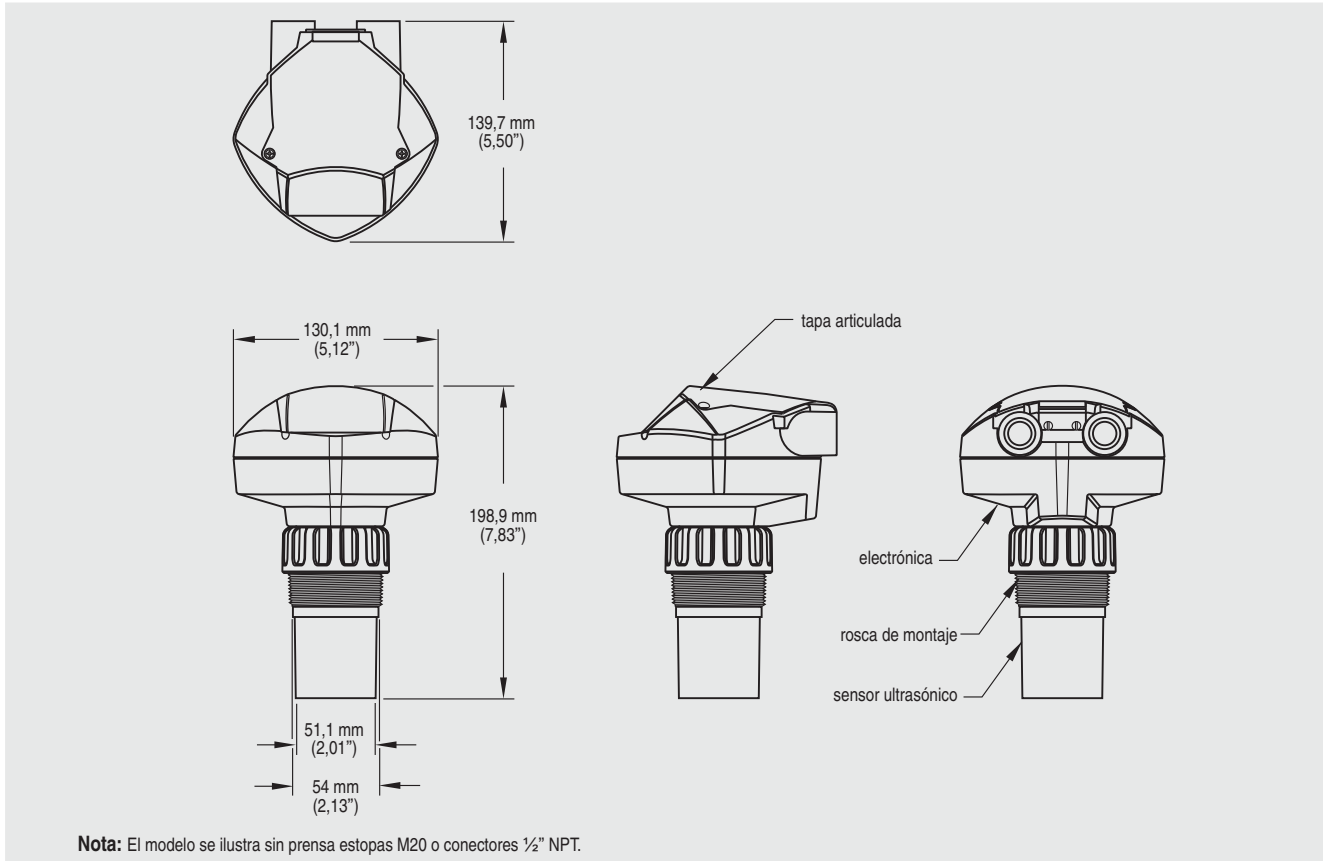
Estándar	nominal 24 V DC, máximo 550 ohmios; 30 V DC máx. 4 a 20 mA
----------	------------------------------------------------------------------

---

**Aprobaciones**

Aplicación general	CSA <sub>US/C</sub> , FM, CE
Seguridad	
• Europa	ATEX II 1G EEx ia IIC T4
• EE.UU.	FM Clase 1, Div. 1, Grupos A, B, C, D (requiere barrera); Clase II, Div. 1, Grupos E, F, G; Clase III
• Canadá	CSA Clase 1, Div. 1, Grupos A, B, C, D (requiere barrera); Clase II, Div. 1, Grupo G; Clase III

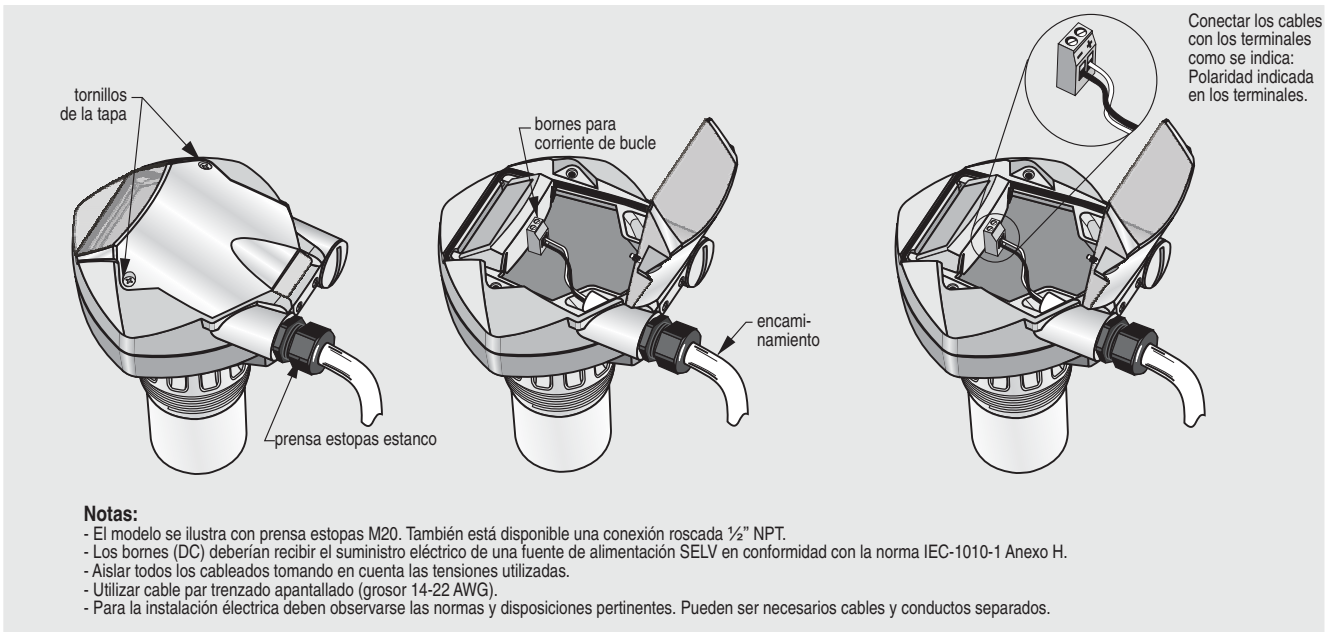
### Croquis acotados



Dimensiones

Probe LU

### Diagrama de circuito



Conexiones

Probe LU

Datos de pedido	Referencia
<b>SITRANS Probe LU</b> Transmisor ultrasónico alimentado por bucle de 2 hilos para medición de nivel, volumen y caudal de líquidos	C) <b>7ML 5 2 2 1 -</b>
<b>Caja</b> Plástico (PBT), 2 x M20x1,5 Plástico (PBT), 2 x 1/2" NPT	1 2
<b>Rango/material sensor</b> 6 m (20 ft), ETFE 6 m (20 ft), copolímero de PVDF 12 m (40 ft), ETFE 12 m (40 ft), copolímero de PVDF	A B C D
<b>Conexión al proceso</b> 2" NPT 2" BSP 2" G / PF2	A B C
<b>Comunicaciones/Salida</b> 4 a 20 mA, HART	1
<b>Aprobaciones</b> Aplicación general, FM, CSA, CE Seguridad intrínseca, FM Clase 1, Div. 1, Grupos A, B, C, D (requiere barrera); Clase II, Div. 1, Grupos E, F, G; Clase III, ATEX II 1G EEx ia IIC T4 Seguridad intrínseca, CSA Clase 1, Div. 1, Grupos A, B, C, D (requiere barrera); Clase II, Div. 1, Grupo G; Clase III	1 2 3
<b>Manual del usuario</b> Inglés Alemán Nota: Indique el manual deseado en una línea separada por favor.	C) <b>7ML1998-5HT01</b> C) <b>7ML1998-5HT31</b>
<b>Guía para la puesta en marcha (adicional)</b> Guía para la puesta en marcha multilingüe Nota: De acuerdo con la normativa ATEX se suministra una guía con cada instrumento.	C) <b>7ML1998-5QR81</b>
<b>Equipos opcionales</b> Calibrador de mano de seguridad intrínseca, EEx ia Módem HART (para PC y SIMATIC PDM) Barrera de seguridad intrínseca Siemens (DC), ATEX II 1 G, EEx ia Contratuera de plástico, 2" NPT Contratuera de plástico, 2" BSP Adaptador universal para montaje, 2" NPT Adaptador universal para montaje, 2" BSP Adaptador universal para montaje, 2" G / PF2	<b>7ML5830-2AH</b> A) <b>7MF4997-1DA</b> <b>7NG4122-1AA10</b> <b>7ML1830-1DT</b> <b>7ML1830-1DQ</b> <b>7ML1830-1BT</b> <b>7ML1830-1BU</b> <b>7ML1830-1BV</b>

A) Sujeto a prescripciones relativas a la exportación AL: N, ECCN: EAR99H

C) Sujeto a prescripciones relativas a la exportación AL: N, ECCN: EAR99

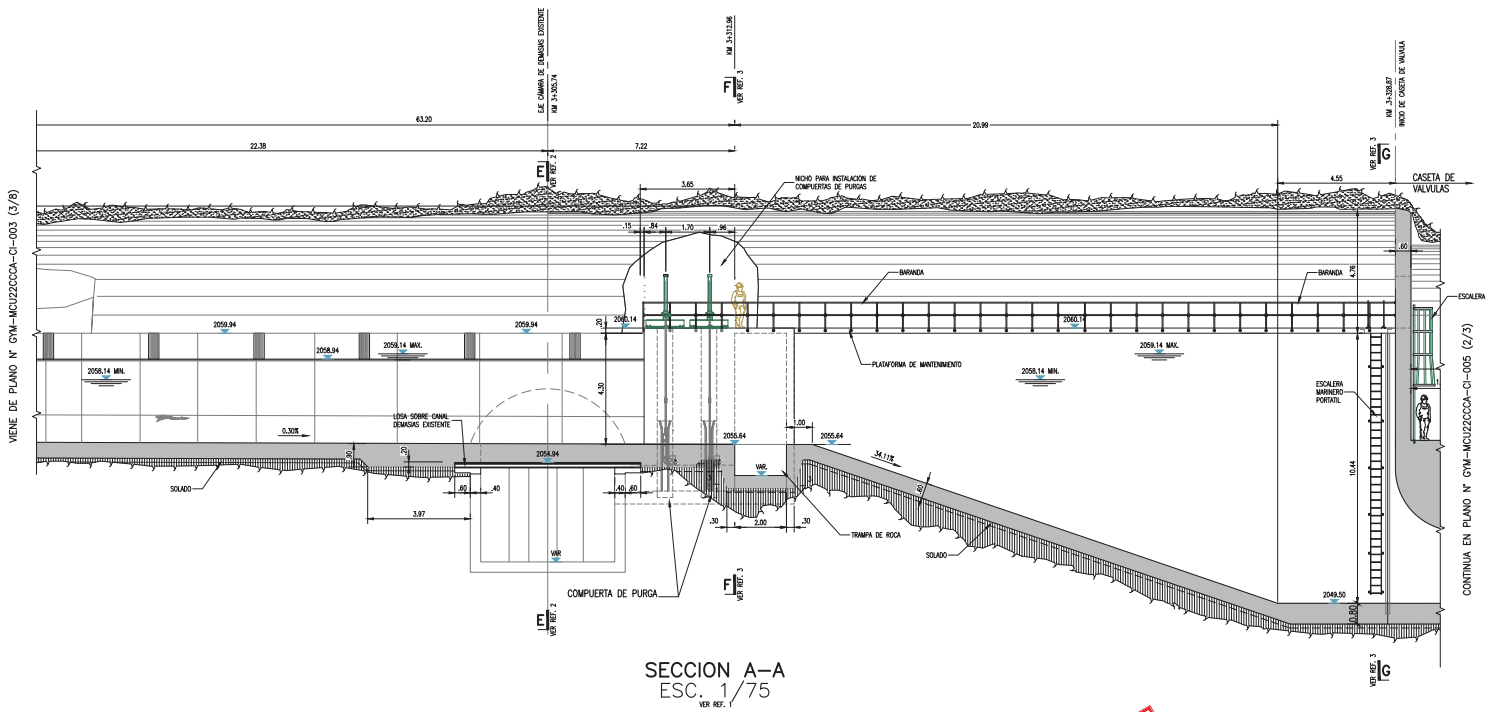


## **ANEXO G**

### **Planos de construcción de la cámara de carga de grupo Francis**

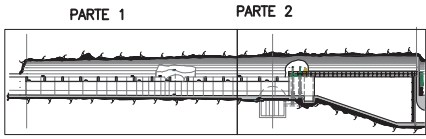
Fuente: Recopilación de planos de la Central Hidroeléctrica





SECCION A-A  
ESC. 1/75  
VER REF. 1

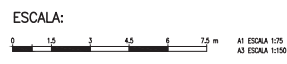
**COMO CONSTRUIDO**



CAMARA DE CARGA  
SECCION GENERAL

PLANOS DE REFERENCIA:

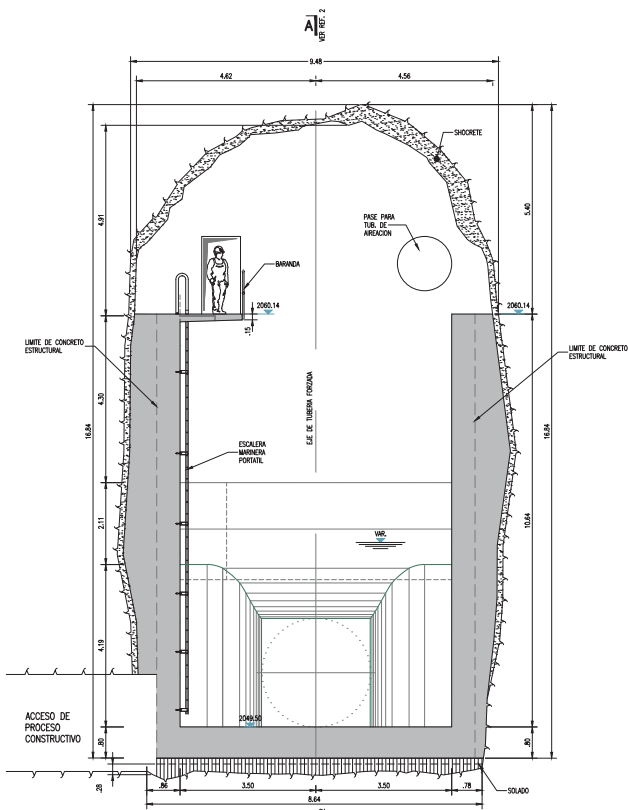
1. GYM-MCU2200CA-CI-003 (1/8-2/8) -> CAMARA DE CARGA - PLANTA NIVEL 2058.14 Y NIVEL 2048.14.
2. GYM-MCU2200CA-CI-003 (7/8) -> CAMARA DE CARGA - SECCION D-D, E-E Y DETALLE 1 Y 2.
3. GYM-MCU2200CA-CI-003 (8/8) -> CAMARA DE CARGA - SECCION F-F Y G-G.



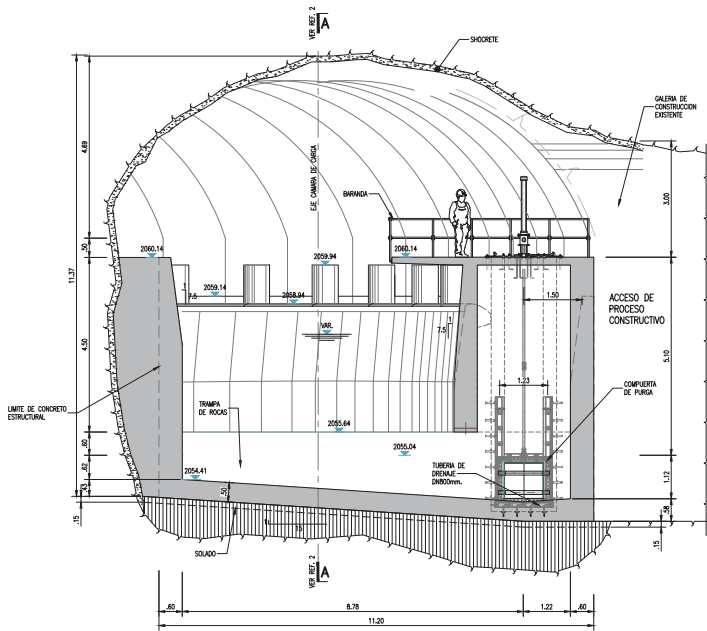
LEYENDA:

- SHOTCRETE
- CONCRETO
- SOLDADO
- N.MAX NIVEL MAXIMO
- N.MIN NIVEL MINIMO

REV. N°	COMO CONSTRUIDO	A.P.	NOV/14
REV. N°	DESCRIPCION	APROB.	FECHA
			ESCALA: INDICADA
	CONSTRUCCION DE LA SEGUNDA FASE DE REHABILITACION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU		DISEÑADO: GJM
	CAMARA DE CARGA SECCION A-A SECCION LONGITUDINAL PARTE 2		DISEÑADO: D.S.S.
			REVISADO: J.R.
			APROBADO: J.P.
			FECHA: NOV.14
PLANO N°:	GYM-MCU2200CA-CI-003	N° DE SECCION:	REVISION:
		4-8	0



SECCION G-G  
ESC. 1/50  
W REF. Y



SECCION F-F  
ESC. 1/50  
W REF. Y

**COMO CONSTRUIDO**

PLANOS DE REFERENCIA:

- GYM-MCU220CA-CI-003 (1/8-2/8) -> CAMARA DE CARGA - PLANTA NIVEL 2058.94 Y NIVEL 2060.14.

LEYENDA:

	SHOROTE
	CONCRETO

ESCALA:



REV. N°	COMO CONSTRUIDO DESCRIPCION	A.P. APROB.	NOV.14 FECHA
			ESCALA: INDICADA
	CONSTRUCCION DE LA SEGUNDA FASE DE REHABILITACION DE LA CENTRAL HIDROELECTRICA MACHUPICCHU		DISEÑADO: D.S.S.
	CAMARA DE CARGA SECCIONES F-F Y G-G		REVISADO 1: J.R.
			APROBADO 1: J.P.
			FECHA: NOV.14
PLANO N°: GYM-MCU220CCA-CI-003	N° DE SECCIONES: 8-8	REVISIÓN: 0	