

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE MEDIDA Y CONTROL PARA
EL LABORATORIO DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DEL
VALLE ORIENTADO A SER OPERADO EN FORMA REMOTA VÍA WEB.**

ING. CARLOS ANTONIO CASTAÑO BARRERA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE POSGRADO INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
CALI – COLOMBIA
2011**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE MEDIDA Y CONTROL PARA
EL LABORATORIO DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD DEL
VALLE ORIENTADO A SER OPERADO EN FORMA REMOTA VÍA WEB.**

**Trabajo de investigación presentado en opción al grado de Magíster en
Ingeniería con énfasis en eléctrica.**

ING. CARLOS ANTONIO CASTAÑO BARRERA

Directores

ÁLVARO BERNAL NOREÑA PhD.

RAMIRO ORTIZ FLOREZ PhD.



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE POSGRADO INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
CALI – COLOMBIA
2011**

FICHA TÉCNICA DEL PROYECTO

Título	
Facultad de Ingenierías	Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Plan de Estudios	Posgrado en ingeniería con énfasis en eléctrica
Estudiante	Carlos Antonio Castaño Barrera
Directores	
Área	Conversión de Energía
Grupo de Investigación	Conversión de energía “CONVERGIA”

*“Dedicado a mi esposa, a mi hija,
a mis padres y a mis hermanos
por ser un soporte importante
para seguir adelante en el camino”*

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Ramiro Ortiz Flores y Álvaro Bernal Noreña por su colaboración y paciencia en el desarrollo de este proyecto.

A la vice rectoría de investigación de la universidad que hizo posible que este proyecto se realizara.

Al personal del posgrado por su colaboración oportuna.

A los almacenistas por su apoyo prestado en la consecución de este proyecto.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Estado del arte.	2
1.3 Estructura del informe.	4
2. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (CH).	5
2.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas.	5
2.1.1 Elementos que constituyen una central hidráulica.	9
2.1.2 Ventajas de las centrales hidroeléctricas.	15
2.1.3 Inconvenientes relacionados con hidroeléctricas.	15
2.2 Variables que intervienen en una central hidroeléctrica.	15
2.3 Control en sistemas de generación hidroeléctrico.	16
2.3.1 Normas utilizadas para la realización del proyecto	17
2.4 Generalidades de la acción de control PID.	17
2.4.1 Estructura del PID.	18
2.4.2 Las características de los controladores P, I, y D.	19
2.4.3 Método de sintonía.	20
2.5 Metodología de trabajo para la implementación del sistema electrónico de medida y control para el laboratorio de generación hidroeléctrica.	21
2.6 Descripción general de la pequeña central hidroeléctrica del laboratorio de pchs de la Universidad del Valle (SGEH).	22
2.6.1 Subsistema de circulación de agua .	23
2.6.2 Subsistema hidroenergético.	23
2.6.3 Subsistema de generación.	24
2.7. Análisis del estado operativo del sistema de generación.	24
2. 7.1 Factor de estado.	24
2.7.2 Análisis de los equipos	25
2.8 Secuencias de operación SGEH.	26
2.8.1 Operación general del sistema de control SGEH.	26
2.8.2 Pre-chequeo de la condición de la planta.	27

2.8.3 Inicio de funcionamiento del sistema hidroenergético (Arranque).	28
2.8.4 Funcionamiento de la unidad generadora y conexión a la red.	28
2.8.5 Apagado de la planta en forma normal y no bajo ninguna anomalía.	29
2.9 Determinación de las variables a medir, capturar y controlar.	29
2.9.1 Subsistema de circulación de agua.	30
2.9.2 Subsistema hidroenergético.	30
2.9.3 Subsistema de generación.	30
2.10 Comunicaciones industriales para la integración de dispositivos en el SGEH.	32
3. CRITERIOS E INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN (SGEH).	33
3.1 Especificaciones generales para la instrumentación del sistema (SGEH).	33
3.2 Características de la instrumentación para el SGEH.	36
3.2.1 Sensores.	37
3.2.1.1 Medición de caudal.	37
3.2.1.2 Medición de nivel.	38
3.2.1.3 Medición de presión.	39
3.2.1.4 Medición de la velocidad del generador.	40
3.2.1.5 Variables eléctricas (voltaje, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia).	41
3.2.2 Actuadores.	42
3.2.2.1 Válvula.	42
3.2.2.2 Regulador de velocidad por frecuencia para el grupo hidroenergético.	43
3.2.3 Equipo de control.	43
3.3 Ajuste de las variables de los instrumentos asociadas al sistema.	46
3.3.1 Caudal (medidor de flujo DFM 5.0)	47
3.3.2 Nivel (<i>reeds switches</i>)	47
3.3.3 Presión (Transmisor inteligente de presión LD 291)	48
3.3.4 Velocidad del generador (REO444R).	49
3.3.5 Variables eléctricas (Medidor Lovato DMK 22).	50
3.3.6 Equipo de control (SNAP PAC-R1 DE OPTO22).	50
4. SISTEMA DE CONTROL EN EL LABORATORIO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA (SGEH)	51
4.1 Subsistema de Ordenadores.	52
4.1.1 Equipos de la sala de control.	53

4.2 Subsistema de software.	53
4.2.1 Software especializado para el manejo y creación de la estrategia de control (PAC PROJECT).	53
4.3 Arquitectura del sistema SGEH.	55
4.3.1. Operación.	58
4.3.2 Control.	58
4.3.3 Proceso.	59
4.4 Configuración de los niveles jerárquicos del sistema de control y supervisión.	59
4.4.1 Primer nivel de control.	60
4.4.2 Segundo nivel de control.	60
4.4.3 Tercer nivel de control.	60
4.5 Comunicaciones.	60
4.5.1 Comunicaciones entre niveles 1 y 2.	60
4.5.2 Comunicaciones entre niveles 2 y 3.	61
4.6 Interfaz hombre –máquina (HMI).	61
4.6.1 programa de dialogo hombre – máquina.	64
4.7 Análisis de requisitos de la aplicación.	64
4.7.1 No funcionales:	64
4.7.2 Funcionales:	65
4.8 Construcción de la interfaz HMI usando la aplicación PAC DISPLAY.	66
4.8.1 Pantalla principal.	67
4.8.2 Pantalla secuencias.	69
4.8.3 Pantalla de tendencias.	70
4.8.4 Pantalla de alarmas.	70
4.9 Estrategia de control utilizando PAC control.	71
5. LAZOS DE CONTROL Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL (SGEH)	73
5.1 Introducción.	73
5.2 Lazos de control.	73
5.2.1 Control de velocidad.	73
5.3 Estudio experimental de sintonía de controladores PI de velocidad.	77
5.3.1 Método de sintonía de ziegler nichols open loop.	78
5.3.2 Método de sintonía de ziegler nichols closed loop.	79
5.3.3 Método de sintonía singular frequency based tuning.	80
5.3.4 Método de sintonía Internal model control (IMC) based tuning.	82

5.4 Control para la potencia activa generada en régimen de trabajo de la planta.	86
5.5 Operación del sistema SGEH.	87
5.6 pruebas y resultados.	88
5.6.1 Pruebas al controlador PI de velocidad.	88
5.6.2 Pruebas al controlador de potencia activa.	90
5.6.3 Prueba Comunicación entre el PAC y la Base de datos para la comunicación Web.	91
6. CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	98
A1	98
A2	104
A3	114

Índice de Figuras

	Pág.
Figura. 2.1 Diagrama de transformaciones de la energía en una central	5
Figura 2.2. Central de agua fluyente.	6
Figura 2.3. Central de embalse.	6
Figura 2.4 Central de bombeo.	7
Figura.2.5 Elementos que conforman una central hidroeléctrica.	9
Figura 2.6. Turbina Francis.	11
Figura 2.7. Turbina Kaplan.	12
Figura 2.8. Turbina Pelton.	12
Figura 2.9. Generador Sincrónico.	14
Figura 2.10. Motor Asincrónico.	14
Figura 2.11 Diagrama en bloques.	19
Figura. 2.12 Diagrama del sistema al inicio del proyecto.	22
Figura 3.1 SNAP PAC OPTO 22.	34
Figura 3.2 Diagrama del sistema con la ubicación de las diferentes variables.	36
Figura 3.3 Caudalímetro de ultra sonidos Doppler para líquidos Greyline Instruments DFM 5.0	37
Figura 3.4 Reeds switchs para medida de nivel.	38
Figura 3.5 Transmisor inteligente de presión LD 291	39
Figura 3.6 Taco generador eléctrico RE0444R de la marca Radio Energie	40
Figura 3.7 Medidor LOVATO DMK 22.	41
Figura 3.8 Válvula TRIAC Control Serie EMI-300E.	42
Figura 3.9 Regulador de frecuencia, 3G3RX-A4185 OMRON.	43
Figura 3.10 Módulos de entrada/salida del PAC.	44
Figura 3.11 Conexión del PAC opto 22 a los instrumentos y elementos de control.	45
Figura 3.12. Ajuste local de cero y span.	48
Figura 3.13. Rama CONF con las opciones para el ajuste.	48
Figura 4.1 Estructura del sistema de control.	52
Figura 4.2 Entorno de programación PAC Control.	54
Figura 4.3 Elementos del PAC Display Configurator.	54

Figura 4.4. Opto DataLink en el servidor.	55
Figura 4.5 Arquitectura del sistema SGEH.	56
Figura 4.6 Protocolos de comunicación involucrados en el control del sistema.	57
Figura 4.7 Arquitectura proyectada para el sistema de control.	57
Figura 4.8 Estructuras de software para realizar el control.	59
Figura 4.9 Secuencia de paso de una ventana a otra.	62
Figura 4.10 Pantalla principal de la interfaz (HMI).	67
Figura 4.11 Indicador de velocidad del motor.	67
Figura 4.12 Panel inferior derecho de las ventanas de la HMI.	68
Figura 4.13 Panel inferior izquierdo de las ventanas de la HMI.	69
Figura 4.14 Pantalla de secuencias.	69
Figura 4.15 pantalla de tendencias.	70
Figura 4.16 pantalla de alarmas.	71
Figura 5.1 Equipos del grupo generador-turbina.	74
Figura 5.2 Respuesta transitoria del controlador PI inicial, algoritmo de sintonización Ziegler-Nichols open Loop.	75
Figura 5.3 Respuesta del controlador PI. Método de ziegler nichols closed loop.	80
Figura 5.4 Respuesta del controlador PI. Método de singular frequency based tuning.	81
Figura 5.5 Respuesta del controlador PI. Método de sintonía Internal model control (IMC) based tuning.	83
Figura 5.6 Índice de desempeño para las cuatro técnicas implementadas.	84
Figura 1.7 <i>Respuesta transitoria del controlador PI con ajuste en la ganancia</i>	85
Figura 5.8 Comportamiento de la apertura de la válvula Vs la potencia generada.	87
Figura 5.9 Respuesta de la velocidad del motor con el controlador PI real y simulado.	89
Figura 5.10. Respuesta ante un disturbio en la entrada del sistema.	89
Figura 5.11. Respuesta de la potencia de salida utilizando controlador Fuzzy	90
Figura 5.12. Respuesta al escalón de potencia de salida utilizando control fuzzy.	91
Figura 5.12. Comunicación entre PAC y base de datos.	92

Índice de Tablas

	Pag.
Tabla 2.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas en función de la potencia instalada	8
Tabla 2.2 variables más importantes en la operación de una central hidroeléctrica	16
Tabla 2.3 Efectos de los controladores Kp, Ki y Kd.	20
Tabla 2.4 Parámetros de sintonía, método de respuesta en frecuencia.	20
Tabla 2.5 Datos bomba (B).	23
Tabla 2.6 Datos motor (M).	23
Tabla 2.7 Datos del motor asíncrono en régimen de generador.	24
Tabla 2.8 Datos de la bomba como turbina.	24
Tabla 2.9 Factor de estado para los elementos.	25
Tabla 2.10 Condiciones de arranque del SGEH.	28
Tabla 2.11 Variables y Unidades básicas para la instrumentación del sistema.	32
Tabla 3.1 Unidades básicas para los instrumentos de medida.	35
Tabla 3.2 Módulos de entradas y salidas de SNAP PAC.	46
Tabla 3.3 Valores para calibración del sensor DFM 5.0.	47
Tabla 3.4 Variables modificadas en el Lovato DMK 22.	50
Tabla 3.5 Direcciones asignadas al controlador.	50
Tabla 5.1 Parámetros de sintonización controlador PI, ziegler nichols open loop.	78
Tabla 5.2 Desempeños del controlador PI, ziegler nichols open loop.	78
Tabla 5.3 Parámetros de sintonización controlador PI, ziegler nichols closed loop.	79
Tabla 5.4 Desempeños del controlador PI, ziegler nichols closed loop.	80
Tabla 5.5 Parámetros de sintonización controlador PI, singular frequency based tuning.	81
Tabla 5.6 Desempeños del controlador PI, singular frequency based tuning.	82
Tabla 5.7 Parámetros de sintonización controlador PI, Internal model control (IMC) based tuning.	82
Tabla 5.8 Desempeños del controlador PI, sintonía Internal model control (IMC) based tuning.	83
Tabla 5.9 <i>Parámetros de sintonización controlador PI.</i>	85
Tabla 5.10 Variables y señales que intervienen en el control de la potencia activa.	86

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El estudio de los sistemas de generación de energía ha sido objeto importante dentro de la formación de los estudiantes de Ingeniería eléctrica y electrónica en la Universidad del Valle y en muchas otras universidades, dentro de estos sistemas se vuelve importante el conocimiento de aquellos que generan la energía con recursos renovables como es el caso de las hidroeléctricas. En la Universidad del Valle se ha instalado un laboratorio prototipo de microcentrales hidroeléctricas que permite el desarrollo de prácticas orientadas al manejo de los elementos y las variables más importantes en los sistemas de generación de energía de este tipo; este sistema didáctico y a escala, permite identificar los elementos y las funciones de una central hidroeléctrica real.

El propósito de este trabajo de investigación es la implementación de un sistema electrónico de medida y control para el laboratorio de generación hidroeléctrica de la universidad del valle orientado a ser operado en forma remota vía Web. Para cumplir dicho fin se desarrollará una interfaz hombre-máquina (HMI) consistente, eficiente y que sea de fácil manejo por los usuarios finales. Por otro lado esta interfaz manejará la información del sistema de control y de todo el conjunto de elementos que componen la microcentral hidroeléctrica, permitiendo enviar todos los datos aun servidor para el control remoto vía web. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación “Interfaz hardware/software para el monitoreo remoto de variables en sistemas de generación de energía hidroeléctrica” aprobado y radicado en la Vicerrectoría de Investigaciones con el CI No. _521_

Se busca que una vez en funcionamiento todo el laboratorio local y remoto, tanto el Sistema Energético Nacional y el Sector Académico dispongan de una unidad para la formación y capacitación de su recurso humano en diferentes niveles. De esta forma, investigadores y estudiantes, además de consolidar sus conocimientos y habilidades para explotar adecuadamente proyectos hidroenergéticos, pueden, a través de la experimentación e investigación, generar innovación y desarrollo en sus proyectos desde el laboratorio remoto.

Los resultados del proyecto pueden ser aplicados a nuevos desarrollos dentro del sistema interconectado nacional o aplicado en zonas no interconectadas. Este último impacto trae consigo desarrollo para zonas apartadas y mejoramiento de su calidad de vida. El sector académico también se beneficia al utilizar este recurso para sus actividades docentes en forma presencial o remota.

1.2 Estado del arte

El desarrollo energético de un país está acompañado con investigación y desarrollo en las áreas en las cuales dispone de recursos. Esta etapa de desarrollo energético requiere proveer espacios para la investigación, en los cuales se actualizan y optimizan los procedimientos de conversión de energía; a la vez que permite formar profesionales acordes con las nuevas necesidades energéticas. Estos espacios usualmente se encuentran en laboratorios de investigación, algunos de ellos especializados en un área de conocimiento o aquellos que investigan la generalidad del proceso de conversión de energía, el laboratorio de pequeñas centrales hidroeléctricas de la universidad del Valle (SGEH), es el primero en su tipo en Colombia y brindará la posibilidad de manejar un proceso de generación completo o parcial, tanto de forma local como de forma remota.

La dinámica de la utilización de los recursos energéticos renovables con el transcurso del tiempo en el mundo ha cambiado en especial los hidroenergéticos, dado que regiones enteras han logrado utilizar gran parte de estos recursos. Es por ello que países desarrollados encaminan su investigación a temas especializados y en aquellos países en crecimiento y con disponibilidad de recursos su investigación se dirige hacia la masificación de estos recursos. Este último tipo de investigación, se ajusta al sistema energético Colombiano.

Dentro de los Países con un gran potencial hidroenergético y en crecimiento, se destacan China y Brasil; los cuales disponen de Institutos para la investigación en el área de generación hidroeléctrica. Esta investigación ha alcanzado un nivel elevado, tal que les permite en la actualidad producir equipos de generación para medianas centrales hidroeléctricas.

A este nivel ha llegado La República Popular de China gracias a un programa conjunto con el Programa de Desarrollo de Naciones Unidas, el cual creó en el año 1981 el Centro Regional para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's) de Hangzhou (HRC) con el propósito de lograr su desarrollo. A la fecha, el centro ha realizado más de 50 proyectos de PCH's (menores de 300 MW) y capacitado a especialistas de diferentes países de mundo. Logros que le han representado recibir el reconocimiento de su gobierno y de entidades internacionales, como ONUDI, PNUD, FAO, entre otros. [1]

Un nivel equivalente en investigación ha logrado obtener Brasil a través del Centro Nacional de Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos – CERPCH, para potencias menores de 10 MW.

Un programa emergente de desarrollo hidroenergético en la región se ubica en Cajamarca – Perú, en donde la ITDG en conjunto con el gobierno Peruano, adelantan el Programa de Nuevas Tecnologías, encargado de investigar y ejecutar proyectos pilotos en zonas rurales; los cuales se difunden a través del Centro de demostración y capacitación de energías renovables. Dentro de sus logros más importantes se encuentra el desarrollo de una turbina Kaplan de alabes fijos de una potencia máxima de 50 KW. [2]

En Colombia se tienen equipos para mostrar el principio de conversión de energía en una central hidroeléctrica, los más recientes se ubican en el museo interactivo de las Empresas Publicas de Medellín. Sin embargo, la finalidad del museo, no permite que a través de estos equipos se pueda llegar a capacitar e investigar. Además de este equipo, al interior de las Empresas Publicas de Medellín, se tiene una unidad de capacitación, destinada a preparar sus operarios, en el manejo de sus plantas y subestaciones a un nivel técnico.

En Colombia la mayoría de centrales hidroeléctricas son de baja y media caída, equipadas con turbinas Francis, condiciones que no pueden ser del todo simuladas en este laboratorio. Es por ello que es necesario diseñar y construir una unidad especializada para la experimentación e investigación en generación de energía hidroeléctrica de baja y media caída. Lo cual conlleva a la necesidad de formar personal que conozca su funcionamiento y esté capacitado para operar SGEH. [3]

Wagner y asociados orientan sus esfuerzos en un laboratorio tele-operado para el desarrollo de prácticas de control discreto en estudiantes de ingeniería eléctrica. Estas prácticas incluyen un sistema de audio y video que muestra en tiempo real, los efectos de sus acciones. En adición, se desarrollaron programas en Java que le proveen al estudiante los conceptos teóricos y modelos gráficos de los controladores que pueden ser implementados en las prácticas. Para evaluar la efectividad del laboratorio tele-operado, se seleccionaron estudiantes que realizaron las prácticas en forma presencial y otros con el laboratorio tele-operado. Los resultados que publicaron indican que no hay diferencia notoria entre los dos grupos de estudiantes [4]

Tzeng presenta en su trabajo un laboratorio virtual de máquinas eléctricas. En su trabajo, Tzeng utiliza los conceptos de sistemas expertos para implementar un agente pedagógico virtual. Este agente posee la experiencia de un educador experto en el tema y puede guiar, evaluar y corregir al estudiante en el desarrollo de la práctica de laboratorio. Este laboratorio ha sido construido con herramientas de realidad virtual y Java [5].

1.3 Estructura del informe.

El informe final de este trabajo tiene la siguiente estructura:

En el primer capítulo, Introducción de la importancia de los laboratorios de investigación en sistemas hidroeléctricos, en el capítulo segundo se hace una descripción general de las centrales hidroeléctricas, luego se hace la descripción del laboratorio de PCH de la Universidad del Valle, de su forma de funcionamiento y de las secuencias de funcionamiento. En el capítulo tercero se presenta los diferentes sensores y actuadores que son implementados en el laboratorio, para la automatización de éste. En el cuarto capítulo se presenta la implementación de la interfaz de operador, en el quinto se plasma el diseño de los controladores para el buen funcionamiento del laboratorio, se hace una comparación de sintonía a los lazos de control, en el sexto capítulo se exponen las conclusiones a las que se arribó tras el desarrollo de este trabajo, así como la bibliografía referenciada a lo largo del informe.

Para evaluar el sistema se realizan pruebas con la interfaz, permitiendo comprobar el funcionamiento del sistema sin carga y con carga, tanto local como de forma remota.

2. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (CH).

En general estas centrales aprovechan la energía potencial que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce, se hace pasar por una turbina hidráulica la cual transmite la energía a un alternador, convirtiéndose en energía eléctrica.

La transformación de la energía potencial gravitatoria en energía eléctrica permite un alto nivel de eficiencia energética, como se observa en la figura 2.1, en el proceso de conversión no toda la energía hidráulica es convertida a eléctrica, aun que en el proceso se puede alcanzar elevados grados de rendimiento, del orden del 90%. Hoy en día pocas tecnologías energéticas consiguen unos rendimientos tan elevados. Como fuente de energía renovable, la energía hidroeléctrica es la más importante en Colombia. Supone aproximadamente el 67% de la energía primaria de origen renovable que se consume en nuestro país.

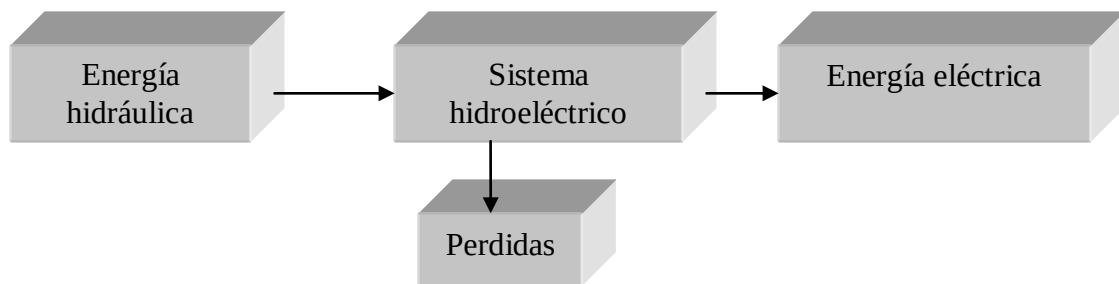


Figura 0-2 Diagrama de transformaciones de la energía en una central

2.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de distintos modos atendiendo a sus características principales, una primera clasificación puede ser:

- Centrales de agua fluente. Son centrales que aprovechan el cauce natural del río. Son poco frecuentes, pues requieren caudales importantes en cualquier época del año. En la figura 2.2 se muestra una central de este tipo.



Figura 0-3. Central de agua afluyente. [6]

- Centrales de agua embalsada. Almacenan agua en un embalse valiéndose de presas, con el objeto de regular el caudal, el cual es variable dependiendo de la época del año.



Figura 0-4 Central de embalse. [6]

A este segundo grupo de centrales, las que embalsan el agua tras una presa se pueden clasificar en:

- Centrales de regulación (de caudal). Son las centrales convencionales como se defino anteriormente. En la figura 2.3 se puede observar este tipo de central.
- Centrales de bombeo. Para su instalación se necesita de dos embalses como se muestra en la figura 2.4. Son aquellas que en función de la demanda pueden volver a bombear el agua, que ha pasado por la turbina desde el embalse inferior hacia el embalse superior.

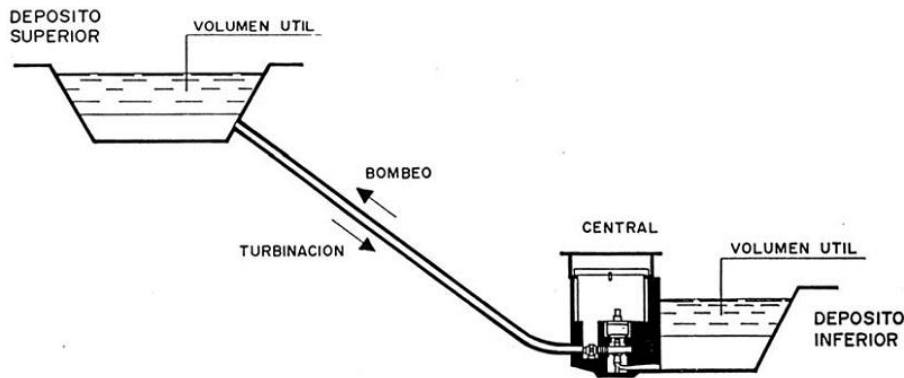


Figura 2.4 Central de bombeo [7]

Podemos hacer una segunda clasificación en base a la altura del salto:

- Centrales de alta presión. Aquellas cuyo salto está por encima de los 200 metros de altura (alcanzando incluso los 2.000 metros). Suelen estar ubicadas en zonas de alta montaña.
- Centrales de media presión. Comprende los saltos entre 20 y 200 metros de altura. Según la altura la central puede estar bajo la presa o alejada de ella si con ello se consigue más altura. Los caudales en este caso alcanzan los 200 m^3/s .
- Centrales de baja presión. Corresponden a saltos pequeños de menos de 20 metros, con caudales en la turbina de unos 300 m^3/s , aunque los hay de más del doble.

En una tercera se pueden clasificar en función del tipo de presa, que dependerá de la configuración topográfica y las características de la tierra en la que se va a construir la presa:

- Presa de arco o bóveda. Es adecuada para presa de gran altura y no excesiva longitud. Es de hormigón armado y sus extremos han de quedar bien estribados.
- Presa de gravedad. La estabilidad de esta presa se consigue por su propia fuerza de gravedad. Es de hormigón sin armar, y su base resulta mayor que en la de arco. Requiere terreno de buena calidad.

- Presa de tierra o escollera. Su base resulta bastante mayor a las anteriores. Dependiendo la de altura y el tipo de tierra. Se usa para poca altura y con una calidad de terreno de cimentación mala. La mayor parte del volumen de tierra se produce de la propia excavación.

También podríamos Clasificarlas según la potencia instalada como a parece a continuación en la tabla 2.1:

Tabla 2.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas en función de la potencia instalada

Organismo	Región	Micro C	Mini C	P.C.H	Grandes
OLADE	América L	0 - 50 kW	51 - 500 kW	500 - 5000 kW	> 5000 kW
IDEA	España	0 - 50 kW	51 - 500 kW	500 - 10000 kW	> 10000 kW
HIC	R.P. China	0 - 50 kW	51 - 500 kW	500 - 25000 kW	> 25000 kW
Banco Mundial		0 - 100 kW	100 kW - 1 MW	1 MW - 20 MW	> 20 MW

OLADE: Organización latinoamericana de la energia

IDEA: Institución de diversificación y ahorro de la energia. España

HIC: Hanzhou international center. República de China

Banco Mundial

Por último, según el sistema de explotación:

- Centrales aisladas o independientes. Alimentan una red de consumo particular sin conexión a una red general alimentada por otras centrales
- Centrales coordinadas. Alimenta una red general de consumo junto a otras centrales.

2.1.1 Elementos que constituyen una central hidráulica. [7] [8] [9]

Los elementos que constituyen una central hidráulica, se encuentran ubicados en la figura 2.5, los cuales son:

A. Presa.

B. Tubería de presión.

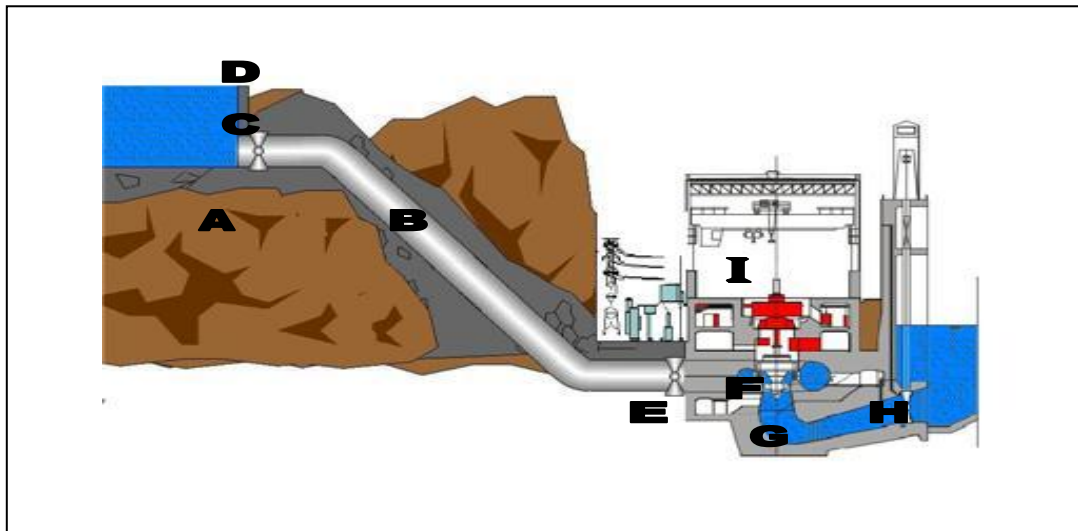


Figura.2.5 Elementos que conforman una central hidroeléctrica

C. Compuertas.

D. Accionamiento de las compuertas

E. Órganos de obturación (válvulas)

F. Cámara de turbinas.

G. Tubo de aspiración.

H. Canal de desagüe.

I. Casa de máquinas.

Presa: Se llama presa a una construcción en el lecho del río para detener el agua, produciendo una elevación de su nivel que permite la derivación de ella, o bien para almacenar el agua regulando el caudal del río. Según el objeto para que estén construidas, las presas se dividen en dos grandes grupos:

- Presas de derivación.
- Presas de embalse.

Presas de derivación: llamadas también azudes y presas de vertedero, están dispuestas preferentemente, para elevar el nivel del contribuyendo a crear el salto y siendo efecto secundario el almacenamiento del agua cuando lo requieran las necesidades de consumo.

Por el contrario, la función de las presas de embalse es el almacenamiento de agua para regular el caudal del río, generando el efecto de la elevación del nivel del agua para producir el salto.

Tuberías de presión: En las instalaciones hidroeléctricas, las tuberías de presión o tuberías forzadas, tienen por objeto conducir el agua a las turbinas, para transformar la energía potencial de la que dispone esta en la cámara de presión, en energía potencial de presión, que tiene junto en la entrada a la turbina y al final de la conducción forzada.

Compuertas: Las compuertas se utilizan para cerrar las conducciones de agua (canales - tuberías), así como para regular el caudal de agua en dichas conducciones. Únicamente hay que tener en cuenta que las compuertas sometidas a grandes presiones (por ejemplo, en las tomas de agua) habrán de ser de construcción más robusta que las compuertas que deben resistir pequeñas presiones (por ejemplo, en los canales de derivación abiertos).

Órganos de obturación (Válvulas): Los elementos de obturación denominados, en general, válvulas, se utilizan para abrir y cerrar el paso del agua por los conductos forzados. Según el empleo a que están destinados, los órganos de obturación pueden ser:

- Órganos de seccionamiento, cuya misión es cerrar el paso del agua hacia las turbinas, cuando sea necesario.
- Órganos de seguridad, que deben sellar el conducto, no solamente en el caso en que el caudal sobrepase el absorbido normalmente por la turbina, sino también, en caso de embalamiento de esta última. Estas válvulas están provistas, casi siempre, de dispositivos automáticos de cierre, que entran en acción cuando la velocidad del agua sobrepasa un valor máximo, fijado de antemano.

En las instalaciones hidroeléctricas se encuentran muchos tipos de elementos de obturación, que cumplen además funciones muy diferentes.

- Válvulas de compuerta.
- Válvulas de mariposa.
- Válvulas esféricas.

Cámara de turbinas: Se denomina cámara de turbinas al espacio destinado en una central hidroeléctrica, para el alojamiento de las turbinas hidráulicas. La cámara de turbinas puede ser abierta, si está en comunicación con el exterior, o cerrada, en el caso contrario.

Tubo de aspiración: El tubo de aspiración sirve de enlace entre la turbina y el desagüe y para aprovechar, además, el salto entre ambos elementos. Se construye de hormigón o de chapa de acero y ha de tener una sección variable para conseguir la máxima recuperación de la energía cinética del agua a la salida del rodete de la turbina.

Canal de desagüe: El canal de desagüe recoge el agua a la salida de la turbina para devolverla nuevamente al río en el punto conveniente. A la salida de las turbinas, el agua tiene todavía una velocidad importante y, por lo tanto, bastante poder erosivo y para evitar socavaciones del piso o paredes hay que revestir cuidadosamente el desemboque del agua de las turbinas.

En saltos bajos en que conviene perder poco desnivel, el canal de desagüe ha de ser corto. En saltos de gran altura y, especialmente en aquellos en que el agua arrastra poco o ningún material sólido, el canal de desagüe puede ser de mayor longitud.

Casa de máquinas: En la casa de máquinas de una central hidroeléctrica, se montan los grupos eléctricos para la producción de la energía eléctrica, así como la maquinaria auxiliar necesaria para su funcionamiento. Estas se pueden clasificar según la disposición general de la casa de máquinas en:

- Centrales al exterior.
- Centrales subterráneas.

Los grupos eléctricos básicos están conformados por un grupo turbina –generador y sus elementos necesarios para el debido funcionamiento; los tipos de turbinas más utilizadas son:

Turbina Francis: Pertenece al grupo de las turbinas de reacción, es decir que el flujo se produce dentro de una cámara cerrada bajo presión. La Francis (figura 2.6) se caracteriza por que recibe el flujo de agua en dirección radial orientándolo hacia la salida en dirección axial, por lo que se considera como una turbina de flujo radial.

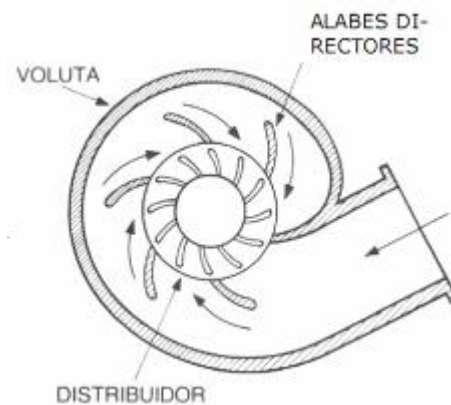


Figura 2.6. Turbina Francis. [6]

Turbina Kaplan: Una instalación con turbina hélice (figura 2.7) se compone básicamente de una cámara de entrada que puede ser abierta o cerrada, un distribuidor fijo, un rodete con 4 o 5 palas fijas en forma de hélice de barco y un tubo de aspiración. También hay otra variante de la hélice consistente en una turbina con distribuidor regulable y rodete de palas fijas.

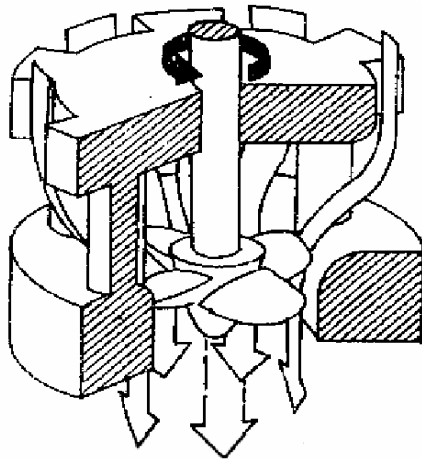


Figura 2.7. Turbina Kaplan. [6]

Turbina Pelton: Es la turbina de acción más utilizada. Consta de un disco circular o rodete que tiene montados en su periferia una especie de cucharas de doble cuenco o álabes como se observa en la figura 2.8. El chorro de agua dirigido y regulado por uno o varios inyectores incide sobre estas cucharas provocando el movimiento de giro de la turbina.

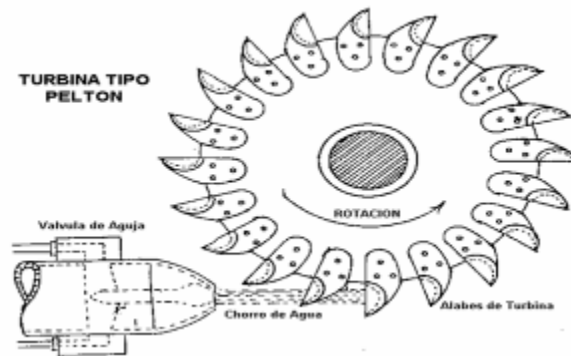


Figura 2.8. Turbina Pelton. [6]

Turbina Michell: También es una rueda hidráulica de gran velocidad. Su diseño es muy parecido al de la turbina Pelton, a diferencia su rendimiento es inferior (80%), pero es más barata. Generalmente no se utiliza para generar energía eléctrica operando a alturas inferiores a los 30 m.

Generador eléctrico (alternador): El generador es una máquina basada en la inducción electromagnética, que se encarga de transformar la energía mecánica de rotación que proporciona la turbina en energía eléctrica. El principio de funcionamiento está basado en la ley de Faraday. Cuando un conductor eléctrico se mueve en un campo magnético se produce una corriente eléctrica a través de él. El generador está compuesto por dos partes fundamentales:

- El rotor (o inductor móvil), que se encarga de generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina.
- El estator (o inducido fijo), sobre el que se genera la corriente eléctrica aprovechable.

Los dos tipos de generadores mas comunes en el mercado se conocen como, generadores sincronicos y Asíncronicos.

Generador Sincrónico.

El generador sincrónico es el de uso prioritario en unidades de generación, para realizar la conversión de energía mecánica a energía eléctrica, un ejemplo se observa en la figura 2.9. Éste tipo de generador tiene el bobinado de campo excitado por corriente continua lo que permite tres formas distintas de excitación: Auto excitación estática, excitación con diodos giratorios y excitación auxiliar [6]. La tensión que se desarrolla en la armadura es alterna, motivo por el cuál es también llamado alternador. El más difundido es el trifásico, debido a que es el método más simple y económico de producir energía eléctrica, por ser más eficiente que el monofásico equivalente (menos pesado) y por su amplia difusión comercial. [11]

En este tipo de generadores la velocidad de conversión de energía mecánica en energía eléctrica se hace de manera constante y se llama velocidad de sincronismo, ésta se termina por:

$$N_s = 60 \cdot F/P$$

N_s es la velocidad de sincronismo.

Se usa $F = 60\text{Hz}$ indicando la frecuencia de la red en Colombia.

P indica el número de polos del motor.



Figura 2.9. Generador Sincrónico. [10]

Generador Asincrónico.

Los motores asincrónicos (figura 2.10) se usan en centrales hidroeléctricas gracias a su simplicidad y bajo costo, el objetivo es hacer girar mediante la turbina el rotor del motor a una velocidad un poco mayor a la velocidad de sincronismo. Teóricamente, a la velocidad angular de sincronismo se obtiene potencia cero, mientras que la potencia nominal (PN) se logra a un deslizamiento $+S$. En la práctica, el deslizamiento $+S$ toma valores que están entre 0.5 % para generadores de gran potencia (del orden de MW) y 2 % para generadores más pequeños (del orden de 100 kW) [4]. La corriente necesaria para el campo se toma de la red y se debe poner un banco de condensadores para compensar la energía reactiva generada.

Para arrancar el motor se debe primero llevar éste cerca a la velocidad de sincronismo y luego se conecta el motor a la red, por medio de un contactor automatizado. El generador trabaja en una primera etapa en régimen de motor y luego aumentando la velocidad con la turbina se pasa al régimen de generador.



Figura 2.10. Motor Asincrónico

2.1.2 Ventajas de las centrales hidroeléctricas.

Son muchas las ventajas que tienen este tipo de centrales entre otras se pueden contar:

- Es una energía renovable.
- No crea residuos, no contamina, es limpia.
- No se requieren combustibles.
- Menor contaminación, conversión mecánica – eléctrica.
- Rendimiento de 80% a 90%.
- Flexibilidad para su conexión y desconexión; algunos minutos.
- Suministro en las horas pico.[11]

2.1.3 Inconvenientes relacionados con hidroeléctricas.

Algunos de los inconvenientes de las hidroeléctricas son:

- Alta Inversión y grandes obras civiles.
- Clima; dependen de las lluvias y la época del año.
- Se deben hacer grandes inundaciones de ciertas zonas geográficas.
- Costo por Kilovatio instalado muy alto.

Los sistemas de transmisión son costosos por estar generalmente lejos de las ciudades.

2.2 Variables que intervienen en una central hidroeléctrica.

Son muchas las variables o parámetros que intervienen en el proceso de generación de energía en una central hidroeléctrica, Estas variables o parámetros son de tipo hidráulico, mecánicos, eléctricos y de otros tipos. A continuación en la tabla 2.2 se dará a conocer las variables o parámetros más importantes que intervienen en el proceso.

Tabla 2.2 Variables más importantes en la operación de una central hidroeléctrica

TIPO DE SEÑAL
Flujo o caudal
Nivel de presa, tanque de carga
Nivel de descarga de la turbina, o desfogue
Presión de columna de agua en la tubería, o presión estática
Presión diferencial
Temperatura del agua de la tubería de presión
Voltajes
Corrientes de fase
Cos Φ , Factor de potencia
Frecuencia de la red
Potencia activa
Potencia reactiva
Potencia aparente
Posición o apertura de álabes en la turbina
Velocidad de la turbina
presión de lubricación de la turbina
Presión de achique de las bombas
Temperaturas del estator y rotor de los generadores
Temperaturas de los cojinetes de los generadores
Temperatura de agua de refrigeración de entrada y salida de los generadores

2.3 Control en sistemas de generación hidroeléctrico.

De acuerdo a la complejidad y funcionalidad del sistema de control en un SGEH, estos se encuentran relacionados a criterios fundamentales, los cuales determinan el tipo y grado de automatismo del sistema. A continuación se presentan los criterios más significativos: [12]

- Numero, tamaño y tipo de grupos turbina-generador
- Tipo de planta
- Tipos de sistemas auxiliares
- Costos de operación, reparación y mantenimiento de equipos
- Naturaleza de la operación (manual o automática)
- Tipo de acceso (local o remoto)

A partir de estos criterios se determinan las funciones generales del sistema de control el cual permite obtener y monitorear la información del proceso, supervisar y proteger la planta y controlar las acciones de la misma. [13]

2.3.1 Normas utilizadas para la realización del proyecto

Los organismos internacionales que contemplan los requisitos para la puesta en marcha, montaje y pruebas de algunos de los equipos principales de la central, estas normas utilizadas son: La norma IEEE 1010 de 1987 describe los sistemas de monitoreo y control típicos que debe tener una central hidroeléctrica en general, sus jerarquías, requerimientos, secuencias de arranque y paro; norma IEEE 1020 entrega una metodología para la puesta en marcha y control típico que debe tener una pequeña central hidroeléctrica; IEEE 1547: Standard for interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, provee de una norma uniforme para la conexión de GD con los sistemas eléctricos, estableciendo requerimientos en cuanto a desempeño, operación, pruebas, consideraciones de seguridad y mantenimiento de las interconexiones [14]; IEC 61850: Communication Network and Systems in Substations, Este estándar se enfoca a los Modelos de Información y el Intercambio de Información. A través del Modelo de Información definido aquí, es posible generar una abstracción que permite identificar los componentes de una sub-estación como objetos pertenecientes a clases y como intercambiar información entre estos [15]; IEC 60870-5: Estándar abierto para la transmisión de información de datos y control en sistemas de telemetría SCADA. IEC 61968: System Interfaces for Distribution Management. Establece un lenguaje común para la integración de distintos agentes (recursos humanos, EMS, automatización de sub-estaciones, almacenamiento de datos, etc). [16]

2.4 Generalidades de la acción de control PID.

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden), y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a

especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia). [17]

El control PID tiene ventajas relacionadas con su bajo costo, sencillez de aplicación y, cuando está correctamente ajustado, proporciona un buen comportamiento dinámico del proceso de control. Los enfoques para el ajuste de los parámetros de ganancia proporcional, integral en el tiempo y el tiempo derivados de acuerdo con un período de muestreo (T_s) del PID se puede dividir en las técnicas de:

- Ziegler y Nichols (Ziegler y Nichols, 1943 y Wang et al 1999.).
- el dominio de la frecuencia (Iwai et al 1999.).
- *ajuste automático* utilizando el método del relé (Huang, 2000) y de adaptación (de ajuste de control de uno mismo) (Åström y Wittenmark, 1995).
- ensayo de optimización heurística y error (Ulkpai y Jayasuriya, 2002).
- para el modelo de control interno (Ho et al 2001.).
- control predictivo (Pomerlau et al 2000.).
- ganancias de escala (Jiang, 1994).
- control robusto (Mattei, 2000).
- Control Inteligente (Coelho et al, 2002).
- reconocimiento de patrones (Kraus y Miron, 1984).

Muchos controles electromecánicos o electrohidráulico son lineales y corresponden a una estructura PID con tres términos de control. La proporcional, la derivada y las acciones integrales, que permitan respuestas de alta velocidad. Los controladores para las turbinas hidráulicas son por lo general PID y su aplicación puede incluir una amplia diversidad de configuraciones. Para esta implementación se utilizara esta estrategia de control para el SGEH.

2.4.1 Estructura del PID.

Consideremos un lazo de control de una entrada y una salida de un grado de libertad, como a parece en la figura 2.11:

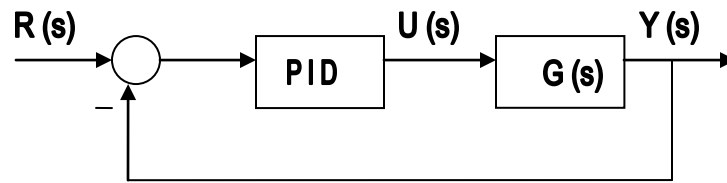


Figura 2.11 Diagrama en bloques

Los miembros de la familia de controladores PID, los denominados P, I, PI, PD y PID.

P: acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir: $u(t) = K_P \cdot e(t)$, que descripta desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

I: acción de control integral: da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i(s) = \frac{K_i}{s} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

2.4.2 Las características de los controladores P, I, y D.

Un controlador proporcional (K_p) tendrá el efecto de reducir el tiempo de elevación y reducirá, sin jamás eliminar, el error de estado estacionario. Un control integral (K_i) tendrá el efecto de eliminar el error de estado estacionario, pero puede empeorar la respuesta transitoria. Un control derivativo (K_d) tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema, reduciendo el sobre pico, y mejorando la respuesta transitoria. Los efectos de

cada uno de los controladores K_p , K_d , y K_i en un sistema a lazo cerrado se resumen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Efectos de los controladores K_p , K_i y K_d .

Rta a L cerrado	T. T repada	Sobre pico	T Establecim.	Error (SS)
K_p	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
K_i	Baja	Sube	Sube	Elimina
K_d	Poco Cambio	Sube	Baja	Poco Cambio

2.4.3 Método de sintonía.

La sintonía de un controlador PID requiere la determinación de las constantes, K_c , T_i , y T_d , ganancia proporcional del controlador, tiempo integral y tiempo derivativo, respectivamente, los cuales permitan alcanzar los índices de desempeño definidos en el diseño del sistema de control. Desde la creación del controlador PID se han definido diferentes métodos o técnicas de sintonía la mayoría de los cuales requieren del conocimiento del modelo de la planta o requiere de experimentos especiales para determinar su comportamiento.

Un ejemplo de los métodos de sintonización es el de Ziegler y Nichols, el cual determina los parámetros de controladores P, PI y PID, teniendo como criterios de desempeño la razón de amplitud de la respuesta y el error permanente, las pruebas se realizaron inicialmente con un controlador solo de acción proporcional, buscando que con un decaimiento del 25% se alcanzara una sensibilidad del 50% de la sensibilidad máxima. El periodo de oscilación crítico lo utilizaron para los modos integral y derivativo [18]

En su trabajo se identifican los siguientes procedimientos para realizar la sintonización:

- **Método de sintonía de lazo cerrado.**
- **Método de lazo abierto.**

En la tabla 2.4 se presentan los parámetros de sintonía obtenidos por el método de Ziegler Nichols para el controlador PID, mediante la respuesta en frecuencia.

Tabla 2.4 Parámetros de sintonía.

Controlador	K	T_i	T_d
P	$0.5 * K_u$		
PI	$0.4 * K_u$	$0.8 * T_u$	
PID	$0.6 * K_u$	$0.5 * T_u$	$0.12 * T_u$

2.5 Metodología de trabajo para la implementación del sistema electrónico de medida y control para el laboratorio de generación hidroeléctrica.

Hoy en día, las soluciones enfocadas a automatización de procesos son ampliamente aceptadas para su uso en sistemas eléctricos de generación. Es por esto que la documentación sugerida para el diseño del sistema de control del SGEH, tiene sus bases en el control de sistemas modernos, el cual ha evolucionado desde los últimos 50 años a un conjunto de normas y estándares bien definidos [19] [20] [21]. Destacan principalmente las normas ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society)[22], las cuales fueron creadas para estandarizar los proyectos de instrumentación y automatización. Debe hacerse hincapié en que estas normas son sólo recomendaciones y por lo tanto no son acatadas por todo el mundo, en este proyecto sucede lo mismo.

Para el desarrollo de la metodología de trabajo para la implementación del sistema electrónico de medida y control para el laboratorio de generación hidroeléctrica, se hace necesario sub-dividir los procesos en los siguientes criterios:

Criterios generales para la automatización del SGHE

- Descripción general del sistema a ser automatizado. (apartado 2.6)
- Definición del número y tipo de señales convencionales de Entrada / Salida (E/S) del proceso. (Estas se encuentran en el apartado 2.9).
- Análisis de los equipos disponibles para la función deseada y su interoperabilidad con la solución prevista: sensores, detectores, variadores, terminales. (En el capítulo 3 se expondrán las características y los equipos necesarios para la medición, operación y control de estas variables).
- Integración de los gestores con la plataforma de control prevista: acopladores, pasarelas, protocolos de comunicación. (se puede encontrar en el capítulo 4)
- Determinar los requerimientos y características del sistema en función de los distintos dispositivos a coordinar: información, tiempos, determinismo, etc.

2.6 Descripción general de la pequeña central hidroeléctrica del laboratorio de pchs de la Universidad del Valle (SGEH).

El laboratorio de la Universidad del Valle, funciona de manera totalmente manual; se compone de una tubería de circulación cerrada de agua. El agua es impulsada a través de la tubería por medio de una bomba, cuya capacidad nominal de bombeo es de 1000 litros por minuto, esta es movida por un motor de 25 Hp, que le proporciona una velocidad constante.

El agua en la tubería, se lleva a la turbina (turbina pelton o bomba trabajando como turbina), la cual, por medio de un acople mecánico, hace girar un motor asíncrono. También cuenta con una serie de válvulas, que permiten variar el flujo de agua que llega a la turbina, al permitir o no su desvío. Un diagrama del sistema se puede apreciar en la figura 2.12.

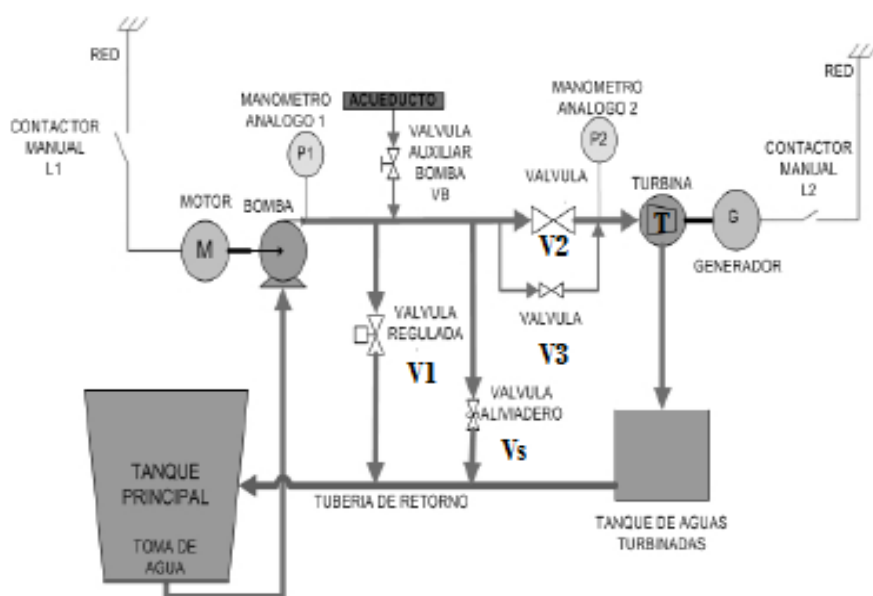


Figura. 2.12 Diagrama del sistema al inicio del proyecto.

El sistema cuenta con dos manómetros para la medición de presión. Dos tanques, el principal, donde se tiene el agua almacenada, y el segundo, el tanque de aguas turbinadas. Este sistema lo podremos repartir en tres grandes subsistemas, que son:

2.6.1 Subsistema de circulación de agua.

Permite la circulación del agua por los diferentes elementos del laboratorio, proporcionando el caudal necesario para el funcionamiento del sistema; este es el encargado de conducir tanto las aguas a turbinar como las aguas ya turbinadas, en un ciclo cerrado. Este constituido por los siguientes elementos:

- Tanque principal: con una capacidad de 2000 litros.
- Tanque para aguas turbinadas: con capacidad para 110 litros.
- Tubería de presión: la longitud es de 6 metros, con espesor de 3 milímetros y un diámetro de 3 pulgadas.
- Tubería de baja presión: encargada de regresar las aguas desde el tanque de aguas turbinadas hasta el principal. Con un diámetro de 12 pulgadas y una longitud de 9 metros.
- válvulas: Válvula (V2) con su respectivo By-pass (V3), Válvula de alivio o seguridad (Vs), Válvula reguladora de caudal (V1).

2.6.2 Subsistema hidroenergético.

Con formado por el grupo moto- bomba que proporcionan la energía potencial al agua, dando como resultado un caudal proporcional a 1000 litros por minuto y una caída aproximada de 40 metros. A continuación se muestra la información de estos elementos en las tablas 2.5 y 2.6:

Tabla 2.5 Datos bomba (B)

UNIDAD	Valor
Potencia (hp)	15
Velocidad (rpm)	3600
Altura (m)	40
Presión (psi)	75
Eficiencia (%)	68
Caudal (lts/min)	1100

Tabla 2.6 Datos motor (M)

UNIDAD	Valor
Potencia (hp)	25 Hp
VOLTAJE (V)	220 / 440
Factor de potencia:	0.85
Velocidad (rpm)	1800

El sistema no cuenta con variador de velocidad, por lo tanto la bomba gira a la velocidad nominal del motor y no se puede regular para generar diferentes alturas.

2.6.3 Subsistema de generación.

El agua por la tubería se lleva a la turbina (turbina pelton o bomba trabajando como turbina), la cual, por medio de un acople mecánico (poleas y banda), hace girar un motor asíncrono que trabaja en régimen de generador. Como el sistema cuenta con una serie de válvulas, que permiten variar el flujo de agua que llega a la turbina, y así regulando la potencia. Los datos referentes a estos equipos se presentan en las tablas 2.7 y 2.8.

Tabla 2.7 Datos del motor asíncrono en régimen de generador

Marca	Siemens	
Potencia activa	7.5 Hp.	5.5 Kw.
Voltaje nominal	220 / 440 Volt	
Corriente nominal	20.44 Amp	
Factor de potencia	0.84	
Velocidad	1730 rpm	

Tabla 2.8 Datos de la bomba como turbina

Tipo	Velocidad (rpm)	Altura (m)	Eficiencia (%)	Caudal (lts/min)
Centrífuga	1750	25	55	430

2.7 Análisis del estado operativo del sistema de generación.

Se realizó una inspección técnica con la finalidad de determinar los equipos que existen en la misma; principalmente analizar el estado de los equipos (factor de estado) e identificar el tipo de señales que van a ser medidas, supervisadas y controladas por el sistema electrónico de control.

2. 7.1 Factor de estado.

Al hacer un análisis del equipo del laboratorio se considera como los principales factores la vida útil de los equipos, su nivel de uso en cuanto a horas de trabajo, el estado actual de los mismos y si necesitan o no mantenimiento. Para ello se ha formulado la tabla 2.9 de valoración de equipos:

Tabla 2.9 Factor de estado para los elementos

CALIFICACIÓN	CONDICIÓN OPERACIÓN	NIVEL DE USO	MANTENIMIENTO	ESTADO
1.0	operativo	Uso normal o moderado	Bueno no necesita reparacion	Vigente
1.5	operativo	mucho uso	Bueno no necesita reparacion	Escasa Obsolescencia
2.0	operativo	mucho uso	Bueno necesita reparaciones normales o rutinarias	Moderada Obsolescencia
2.5	operativo	mucho uso	Regular, necesita reparaciones	Obsolescencia

Esto se hizo con la finalidad de brindar una clara visión del estado del equipamiento del laboratorio SGEH para la realización del proyecto.

2.7.2 Análisis de los equipos

a) Los generadores (F.E=1.5), las turbinas (F.E.=1.5) debido a su vida útil no requieren ser cambiados.

b) Los tableros de control y protección para el grupo generador deben ser implementados por que con estos no se cuenta.

c) no se necesita estación de transformación por operar al mismo nivel de voltaje de la red existente.

Estado de las tuberías.

La tubería de presión del laboratorio tienen una altura bruta de 1.55 m, una longitud de 3.2 m y 3 pulgadas de diámetro (F.E=1.5).

Parte eléctrica en la casa de máquinas.

No cuenta con tableros integrados de control y potencia del grupo; para el grupo generador, en donde se encuentra el interruptor para encendido del primo motor de la bomba, sus instalaciones no son las adecuadas para la protección de éste y de los que lo operan.

2.8 Secuencias de operación SGEH.

Las secuencias de operación de cada uno de los subsistemas que conforman el laboratorio, así como su manejo a través del sistema de control y vía web, se diseñan teniendo en cuenta las etapas de operación general, tal como aparece a continuación:

- Secuencia de Arranques de las unidades: Locales, remotos, automáticos ó manuales.
- Secuencias de paro de unidad: Paro normal, de emergencia, parcial.

2.8.1 Operación general del sistema de control SGEH.

Como en toda central generadora la operación se realiza teniendo en cuenta unos procesos secuenciales (encendido, trabajo y apagado), los cuales deben ser cumplidos para proceder al siguiente. A continuación aparece una relación del lugar y el autor del proceso, que clasifican el control.

En función del “lugar” desde el que se realiza la acción de control, ésta se clasifica como:

- LOCAL: La acción de control se efectúa a pie de máquina por el operador del sistema.
- REMOTO: La acción de control se efectúa desde un punto distante.

En función del autor de la acción de control ésta se clasifica como:

- MANUAL: La acción de control es ejercida por el operador de planta.
- SEMI-AUTOMATICO: Este modo de operación requiere de comandos dados por el operador para hacer la transición de una fase a otra de la operación.
- AUTOMATICO: La acción de control es ejercida por un automatismo lógico en esta implementación es un PAC.

De acuerdo con lo anterior se definen los modos de operación siguientes:

- LOCAL MANUAL: En este modo de operación un accionamiento es operado a pie de máquina por un operador cualificado mediante los dispositivos correspondientes.
- LOCAL AUTOMATICO: En este modo de operación un accionamiento es operado a pie de máquina por un automatismo local en sitio, mediante los dispositivos correspondientes.
- REMOTO MANUAL: En este modo de operación un accionamiento es operado desde un centro remoto por un operador mediante las estructuras existentes.

- REMOTO AUTOMATICO: En este modo de operación un accionamiento es operado desde un centro remoto por un automatismo mediante los dispositivos correspondientes.

Cuando se empieza a utilizar la estrategia de control, se debe escoger entre las posibilidades (manual, semiautomática o automática), en el modo manual se puede hacer uso independiente de cada una de las partes que se controlan en el sistema, permitiendo con esto una inspección detallada del funcionamiento de cierta parte; en este modo de operación se pueden realizar pruebas o simulacros individuales del funcionamiento de:

- funcionamiento de la motobomba.
- funcionamiento de la válvula de control V1.
- Arranque del generador (motor asincrónico) alimentado desde la red.

Sin tener en cuenta en que modo de operación esté el SGEH como se mencionó anteriormente, el sistema sigue una secuencia lógica de eventos durante cada uno de los pasos de funcionamiento que se mencionan a continuación.

- Pre-chequeo de la condición de la planta antes del encendido.
- Inicio de funcionamiento del sistema hidroenergético.
- Funcionamiento de la unidad generadora y conexión la red.
- Apagado o desconexión del sistema SGEH.

Se debe recordar que las secuencias de arranque y parada de la unidad generadora: En el laboratorio se implementan, con la norma IEEE 1010-87 numeral 4. Control Sequencing Generating Units.

2.8.2 Pre-chequeo de la condición de la planta.

En esta etapa se verifican las condiciones iniciales, el estado de determinados equipos y señales, que se establecen como referente obligatorio para el inicio del funcionamiento del SGEH. A continuación aparece en la tabla 2.10 el listado de los elementos o señales con su correspondiente condición inicial para el correcto arranque del sistema:

Tabla 2.10 Condiciones de arranque del SGEH.

Condiciones para arrancar	Estado o condición
Válvula de Control CV1	En apertura total
Válvula esférica HV2	En apertura total
Nivel del Tanque Principal	Nivel Máximo
Motor 25 H.P.	apagado
Generador	apagado
Tensión de Fases	Valores Nominales (220 V)
Estado Instrumentos de medición	Normal Operación
Velocidad Grupo Turbina-Generador	Detenido (0 RPM)
Presión Bomba	0 PSI
Presión Turbina	0 PSI

2.8.3 Inicio de funcionamiento del sistema hidroenergético (Arranque).

Después de que las condiciones de pre-chequeo se han cumplido, entonces se procede a realizar las siguientes acciones para el arranque:

- Se cierra el contactor (C1) que energiza el sistema hidroenergético (motobomba).
- Se espera la detección de presión en la tubería (se auto cebe la bomba).
- Conexión del sistema a la red: después que los pasos anteriores se han dado, el sistema procede a realizar las siguientes acciones para realizar la conexión a la red:
- La válvula de control (V1) se cierra para regular la velocidad del grupo turbina generador, hasta alcanzar el 97% de la velocidad de sincronismo (1750 rpm). La velocidad de sincronización para este sistema es de 1800 rpm, porque el generador es de 4 polos y en Colombia se trabaja a una frecuencia de 60 hz.

2.8.4 Funcionamiento de la unidad generadora y conexión a la red.

Cuando se han alcanzado las condiciones antes expuestas en el numeral 2.8.3, se procede a realizar la conexión a la red de la siguiente forma:

- Se cierra el contator C2 el cual conecta el sistema a la red, el generador trabaja en régimen de motor.
- Después que pasa el transitorio de corriente en el proceso de conexión, aproximadamente 2 segundos, se cierra el C3 para permitir que la variable de

corriente pueda ser leída por el analizador de red, y posteriormente C2 se abre (todo esto para proteger el instrumento de medida “Lovato”).

- Con las acciones anteriores se establece el voltaje y frecuencia de la red, todo esto es posible porque el generador es asíncrono y él permite entrar a la red como motor; aumentando con la válvula V1 el caudal y por ende la velocidad, el motor pasar a régimen de trabajo de generador.
- Para que el sistema tenga una respuesta de potencia, solo se le debe dar un valor de referencia y lo que realiza la estrategia es:
- Si la potencia deseada es superior a la generada, la válvula de control V1 se cierra para aumentar el flujo de agua a turbinar.
- Si la potencia deseada es menor a la generada en el momento, la válvula V1 se abre para que la turbina genere menos fuerza.

2.8.5 Apagado de la planta en forma normal y no bajo ninguna anomalía.

Para realizar esta acción se deben cumplir los siguientes pasos:

- La válvula V1 se abre hasta que la potencia generada sea la menor (cero vatios).
- El contactor C2 se cierra para aislar al analizador de la red. Luego a esto C3 se abre.
- C2 se abre, desconectando el generador de la red.
- La válvula de control se abre a su capacidad máxima para reducir a la velocidad mínima el grupo turbina – generador.
- Por último el contacto C1 del motor de la motobomba, se abre para que no halla mas paso de caudal al sistema.

2.9 Determinación de las variables a medir, capturar y controlar

El SGEH consiste en un sistema no lineal. Teniendo en cuenta las características del sistema, las variables a medir, capturar y controlar serán clasificadas de acuerdo a su ubicación en cada uno de los subsistemas expuestos en el apartado 2.6.

2.9.1 Subsistema de circulación de agua

Está constituido por los siguientes elementos: tanque principal, tanque para aguas turbinadas, tubería de presión, tubería de baja presión, Válvula tipo esférica (V2) con su respectivo By-pass (V3), válvula de alivio o seguridad (Vs), válvula reguladora de caudal (V1). Teniendo en cuenta los elementos que constituyen este subsistema se determinan las siguientes variables:

El caudal: éste no solo se va a medir sino también a controlar. Éste es movido por una motobomba que hace las veces de presa (aproximadamente una caída de 40 metros) y es controlado por una válvula motorizada ubicada en V1 (figura 2.12. La válvula nos proporciona una señal de control.

El nivel del embalse: en nuestro sistema es importante conocer éste (nivel máximo y nivel mínimo) en el tanque principal para tener un arranque óptimo y seguro del sistema.

La presión en la tubería: se requiere un constante monitoreo para poder conocer el comportamiento de las presiones en el funcionamiento del sistema, se necesita medir presión antes de la válvula de regulación V1 y a la entrada de la turbina o bomba como turbina, debido a que si se tiene alguna pérdida de presión o sobre presión en algún punto del sistema, éste va a tener problemas presentando un posible deterioro de la planta y por esto es necesario que se realicen estas medidas a lo largo del proceso.

2.9.2 Subsistema hidroenergético

Conformado por el grupo moto-bomba que proporcionan la energía potencial al agua. La variable que podemos encontrar en este grupo es la velocidad del conjunto, que es controlada por un variador de velocidad, para que el grupo gire a diferentes velocidades y se realice control de caudal.

2.9.3 Subsistema de generación

En este subsistema encontramos el grupo turbina - generador (turbina pelton o bomba trabajando como turbina y un motor asíncrono como generador).

Teniendo en cuenta las características del grupo generador se pueden tener las siguientes señales:

Del funcionamiento mecánico.

Velocidad en el eje del generador: esta señal proporciona la información necesaria para realizar la secuencia de sincronización del sistema tanto en red aislada como en red interconectada.

Torque en el eje (turbina o generador): proporciona la caracterización de los elementos en determinadas instancias de trabajo, se debe recordar que este sistema permite el estudio del comportamiento de los elementos en diferentes situaciones de trabajo.

Por otra parte se deben tener todas las señales eléctricas básicas de un sistema de generación las cuales son:

- Frecuencia
- Voltajes,
- Corrientes,
- Potencia activa y reactiva
- Factor de potencia

Se realiza un resumen de las variables en el proceso en la tabla 2.11:

Tabla 2.11 Variables y Unidades básicas para la instrumentación del sistema.

<i>VARIABLE</i>	<i>UNIDAD DE MEDIDA</i>
<i>Nivel</i>	<i>Metros (m)</i>
<i>Caudal</i>	<i>Metros cúbicos / minuto (m^3/min)</i>
<i>Presión</i>	<i>Psi</i>
<i>Velocidad</i>	<i>Revoluciones por minuto (rpm)</i>
<i>Torque</i>	<i>Newton. Metro (N . M)</i>
<i>Frecuencia</i>	<i>Herz (Hz)</i>
<i>Voltaje</i>	<i>Voltios (V)</i>
<i>Corriente</i>	<i>Amperios (A)</i>
<i>Potencia Activa</i>	<i>Vatios (W)</i>
<i>Potencia Reactiva</i>	<i>Vares (var)</i>
<i>Factor de Potencia</i>	<i>Cos Φ</i>

2.10 Comunicaciones industriales para la integración de dispositivos en el SGEH

El objetivo primario del sistema de comunicación es el de proporcionar el intercambio de información (de control) entre dispositivos remotos. Este intercambio de información puede realizarse en base a distintas tecnologías:

- Comunicación punto a punto analógica.
- Comunicación punto a punto digital.
- Comunicación punto a punto híbrida.
- Comunicación digital con bus de campo.

En este proyecto se utilizará una comunicación punto a punto híbrida (análoga – digital), como se expuso en el apartado 2.9 la cantidad de señales que se manejan (alrededor de 10), elimina la necesidad de un bus de campo, eso sin tener en cuenta los costos de éste último que incrementaría en un valor apreciable el sistema.

3. CRITERIOS E INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN (SGEH).

El proceso de la instrumentación en las actividades productivas, investigativas y lúdicas humanas han permitido un gran avance tecnológico en todos los campos de la ciencia aplicada. En nuestro caso la instrumentación del laboratorio de pequeñas centrales hidroeléctricas permite medir, controlar y registrar las variables que intervienen en este proceso, con el fin de optimizar los recursos utilizados en él.

A continuación aparece una definición de los elementos utilizados para la instrumentación de campo:

- Sensores. Se entienden como tales los equipos captadores de variables del proceso.
- Actuadores. Se entienden como tales los equipos finales de control (regulación y todo/nada).
- Armarios de agrupación de instrumentos (AAI). Se entienden como tales las envolventes destinadas al alojamiento de sensores.
- Cajas de agrupación de señales (CAS). Se entienden como tales las envolventes destinadas a la concentración, a efectos de cableado, de señales digitales, analógicas o de comunicación.

3.1 Especificaciones generales para la instrumentación del sistema (SGEH).

El sistema de instrumentación electrónico usa dispositivos tanto analógicos como digitales y está basado en la técnica de microprocesadores, definido como instrumentación inteligente. Los transmisores de variables del proceso disponen de S/E como se muestra en la tabla 3.1. Las señales se integran en un equipo de tecnología digital PAC ("controladores de automatización programables"). Este instrumento de control (PAC) combina la robustez de un controlador lógico programable, con las funciones de un PC en una arquitectura de software accesible y flexible.

Para la función anteriormente descrita en este proyecto, se decidió por el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22 [24], el cual se observa en la figura 3.1. Teniendo en cuenta los siguientes criterios se hizo la selección de éste:

- La comunicación esta basada en el estándar Ethernet, lo cual facilita la información con otros sistemas en red, por medio del manejo de bases de datos (MySQL, Access y Server SQL).
- Es un producto que ofrece una hibridación de la PC y del PLC. Los PAC combinan las mejores características de la PC, incluyendo el procesador, la RAM, y software potente, con la confiabilidad, dureza, y naturaleza distribuida del PLC.
- Los PAC combinan el empaque y dureza del PLC con la flexibilidad y funcionalidad de software de la PC. Estas nuevas plataformas son ideales para control sofisticado y registro de datos en ambientes rudos.
- Emplea una plataforma de desarrollo única con una base de datos única para el desarrollo de tareas a través de un amplio rango de disciplinas.
- Integra muy estrechamente el hardware y el software del controlador.
- Funciona en arquitecturas modulares y abiertas.
- Utiliza diferentes estándares para interfaces de red, lenguajes y protocolos que le permiten intercambiar información con sistemas de múltiples proveedores.
- Este equipo proporciona una herramienta conocida como el Opto Data link, que proporciona el acceso de la información del controlador a servidor para el control desde la Web.



Figura 3.1 SNAP PAC OPTO 22.

Desde este controlador se integran todas las señales, permitiendo que los protocolos de comunicación (conexión 4 a 20 mA, -10/+10VDC, RS 485, RS 232) con los que se opera, midan y controlan el sistema. En este proyecto la cantidad de señales que se manejan (alrededor de 10), elimina la necesidad de un bus de campo, eso sin tener en cuenta los costos de éste último que incrementaría en un valor apreciable el sistema.

Todas las señales participantes en el proceso usan instrumentos independientes para indicación y disparo; Se considera señal toda aquella que pueda provocar un cambio del proceso.

Los sensores, registradores, indicadores, reguladores cumplen los siguientes requisitos:

- El error máximo de medida no es superior al $\pm 0,5\%$ del alcance.
- La histéresis no excederá del $0,5\%$ del alcance.
- La banda muerta no superará el $0,25\%$ del alcance.
- El cambio en la señal de salida por variación de la temperatura ambiente de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ no excederá del 1% del alcance.
- Para sus respectivos valores de medida se debe contar como mínimo con las siguientes unidades que aparecen en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Unidades básicas para los instrumentos de medida.

VARIABLES	UNIDADES
CAUDAL	m^3/h o lt/m
PRESIÓN	Kgr/cm^2 , bar o psi relativos / absolutos
NIVEL	0 – 100 % lineal
ASPIRACION	Mm de H ₂ O
LINEAL	Metros y mm
DENSIDAD	Gr / cm^3

Los instrumentos, componentes y elementos del sistema tienen certificado de prototipo que está de acuerdo con su respectiva norma (norma UNE, norma europea E.N, etc).

3.2 Características de la instrumentación para el SGEH.

A continuación aparece la figura 3.2, la cual muestra el sistema con la identificación de las variables, que permitieron la determinación de los diferentes equipos necesarios para la instrumentación adecuada del sistema. Las diferentes variables fueron ubicadas con una gran aproximación a lo real para garantizar una ubicación espacial correcta en el sistema de generación del laboratorio.

Se debe mencionar que los diferentes métodos de medida para las variables en el presente trabajo no son explicados en su extensión, por que ya fueron presentadas en el trabajo de grado “Análisis y especificación de la instrumentación para implementar la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica” [25]

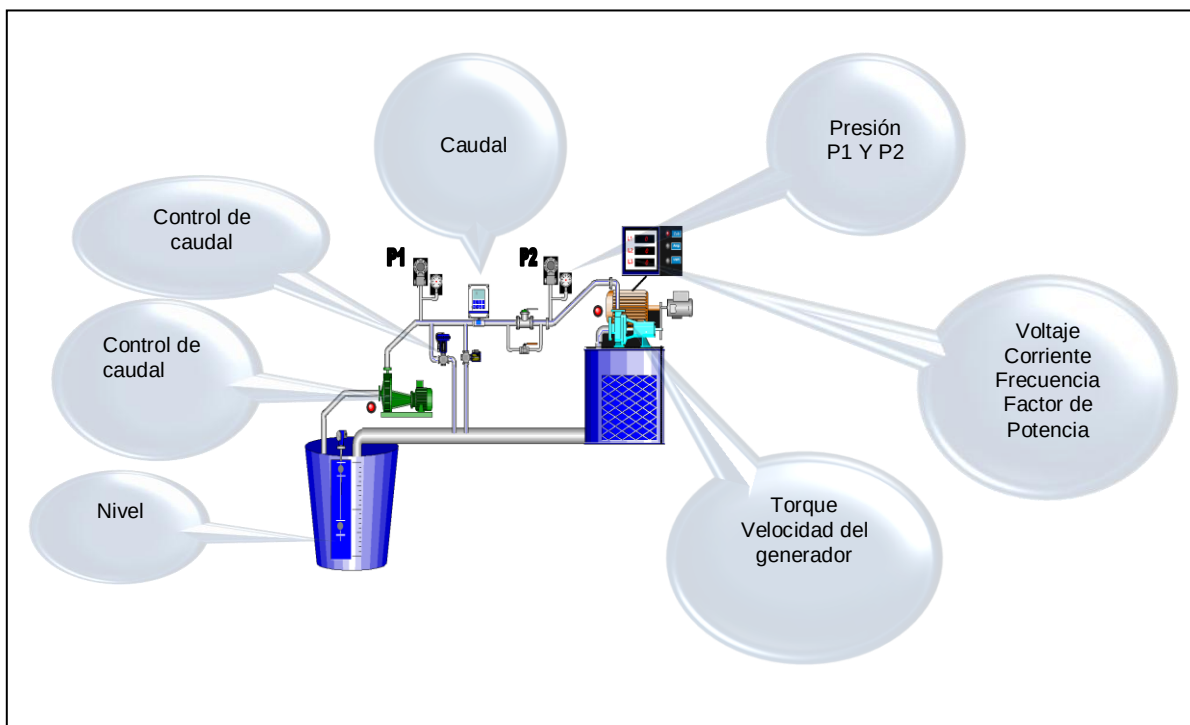


Figura 3.2 Diagrama del sistema con la identificación de las diferentes variables.

3.2.1 Sensores.

3.2.1.1 Medición de caudal.

El caudal que se presenta en el sistema es de tipo turbulento y con partículas en suspensión, para la aplicación de medición de caudal en la tubería de presión de 3 pulgadas de diámetro se usa un medidor de tipo ultrasonido (tiempo de tránsito o Doppler). La medición se debe a una señal acústica que es reflejada de regreso al sensor por el movimiento de partículas o burbujas de gas suspendidas en el fluido. El sensor es un medidor DFM 5.0 y se encuentra fijado a la tubería por medio de dos tornillos en forma de U y el sensor por medio de una banda, de forma robusta como se puede observar en la figura 3.3.



Figura 3.3 Caudalímetro de ultrasonidos Doppler para líquidos Greyline Instruments DFM 5.0

Algunas de sus características principales son:

- Medición de partículas en suspensión o burbujas con tamaño de 100 micras y una concentración mínima de 75 ppm.
- Sensor ultrasónico sin impacto.
- Exhibición grande, puesta a contraluz del LCD totalizador 12-Digit.
- Medida de la corriente contraria 4-20mA aislado (1000 ohmios).
- 2 relays de control programables.
- Ajuste automático de la sensibilidad. [26]

Criterio para la selección: en el mercado existen diversos instrumentos que realizan esta función, con características similares pero éste presenta la diferencia en su capacidad para diversos tamaños de tubería y que su costo se ajusta a los valores presupuestados para este proyecto.

3.2.1.2 Medición de nivel.

Teniendo en cuenta que el tanque principal se encuentra ubicado en la parte posterior del laboratorio, protegido por una tapa plástica, una cubierta de tejas de zinc y que el agua que utilizamos para el trabajo del laboratorio es de tipo estancada, pudiéndose con el tiempo presentar cambios. El indicador de nivel (figura 3.4) se dimensionó para cubrir los cambios en el agua y los rangos que se obtuvieron en ensayos, en operación normal (0.8 metros y 1.2 metros) y no de aquellos en extremo anormales. Éste tiene una tecnología que permita censar estos dos niveles por medio de flotadores (tipo *reeds switches*), estos generan una señal de inicio y fin de carrera, trabajando estos como switch. El cuerpo del sensor es de acero inoxidable para que soporte estar sumergido en el tanque principal, el cual tiene una profundidad de 1.45 metros, éste sensor se encuentra sujetado por una estructura de acero que fue clavada en el terreno al lado del tanque para proporcionarle un apoyo mecánico.



Figura 3.4 Reeds switches para medida de nivel

Los gráficos indicadores o escalas para los instrumentos de nivel están graduados de bajo o alto nivel. Éste sensor es de tecnología a dos hilos, alimentados de 12 a 24 Vcc y salida 4-20 mA.

3.2.1.3 Medición de presión.

Para transmisores de presión el elemento de medida utilizado es un diafragma o membrana (método tipo transductor capacitivo) ya que la planta presenta gran cantidad de vibraciones. Los rangos de ajuste de la presión están de acuerdo con las características del fluido y la tubería de presión en la cual estén instalados. El acople es roscado de diámetro de $\frac{1}{4}$ "y son dos unidades como la que aparece en la figura 3.5.

El cuerpo del sensor es de metal y cuenta con una pantalla para la determinación del valor local. La tecnología esta basada en un microprocesador 4 a 20 mA Y comunicación digital HART. Para realizar esta función se tiene el transmisor inteligente de presión LD 291 de marca smart (figura 3.5) que cumple con todos estos requerimientos.



Figura 3.5 Transmisor inteligente de presión LD 291

Los equipos de presión tienen un factor de sobre presión de 1,3 veces al valor final de escala. Los rangos de presión son completos por lo que el límite inferior es el cero de presión relativa y superior de 120 psi.

Unas de las características básicas de este instrumento se muestran a continuación:

- Fuente de Energía de 12 a 45 Vcd.
- La exactitud esta en un valor de $\pm 0.1\%$ del span calibrado

- Indicador de cristal líquido de 4½-dígitos numéricos y 5 caracteres alfanuméricos. Permite montaje en varias posiciones facilitando la visualización.
- Limites de temperatura
Ambiente: -40 a 85 °C (-40 to 185 °F)
Proceso: -40 a 100 °C (-40 to 212 °F) - (Aceite de Silicona), 0 a 85 °C (32 a 185 °F)
- (Aceite Fluorolube) [27]

Criterio para la selección: a la hora de la selección de este instrumento de medida, se observa que éste cumple con los requerimientos generales exigidos en el sistema para el cumplimiento de las necesidades, además de lo anterior su costo en el mercado es el más favorable, de rápida adquisición y gran oferta de mantenimiento.

3.2.1.4 Medición de la velocidad del generador.

La medición de esta variable permite tener control en la velocidad del generador para conectarse a la red, para nuestro caso no debe sobrepasar las revoluciones (1800 rpm) para las que fue diseñado y construido el generador, o sino presentará daños eléctricos y mecánicos. Esta medida se realizará en el eje del generador por medio del tacómetro eléctrico RE0444R de la marca Radio Energie (figura 3.6), el cual proporciona un voltaje de DC proporcional a la velocidad; la sensibilidad debe estar entre 5 y 10 mV por cada r.p.m. y permite medir velocidades de hasta 12000 r.p.m. [28]



Figura 3.6 Taco generador eléctrico RE0444R de la marca Radio Energie

Se encuentra acoplado al eje del generador por medio de un acople mecánico y colocado entre los ejes de éstos.

Criterio para la selección: de los equipos existentes en el mercado, éste es el que presenta las mejores características en cuanto a su funcionamiento en los rangos de medición, como en las piezas y mantenimiento. Pero la característica más relevante es su posibilidad de soportar gran velocidad, permitiendo con esto que el sistema pueda cambiar sin tener mayor traumatismo, ya que éste es modular en el espacio de generación.

3.2.1.5 Variables eléctricas (voltaje, corriente, frecuencia, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia).

Todas estas variables son medidas por un analizador de red que incorpore todas las variables, caracterizado por que la medida de corriente es de forma indirecta, por medio de transformadores de corriente por los grandes valores de ésta en este sistema y a su bajo consumo de potencia. La medida de voltaje es de forma directa porque se manejan valores de 0 voltios a 220 voltios. Para esta función se cuenta con el medidor LOVATO DMK 22 (figura 3.7). [29]



Figura 3.7 Medidor LOVATO DMK 22.

Características principales:

- Rango de medición de la tensión: 60 a 830VAC fase-fase y 30 a 480VAC fase-neutro.
- Rango de medición de la frecuencia: 45 a 65Hz
- Rango de medición de la corriente: 0,05 a 6 Amp.
- Relación TC programable: 1,0 a 2.000.
- Precisión de las medidas de tensión y corriente: clase 0,5 (+0,25% f.e. +1dígito).
- Precisión de las medidas de energía activa: clase 2 (IEC/EN 62053-21 y IEC/EN 62053-23).
- Grado de protección: IP54 en el frente DMK22 IP20 en el lado posterior.
- Temperatura de funcionamiento: -20...+60° C

Criterio para la selección: los analizadores de red presentes en el mercado, todos son conseguidos bajo pedido, esto dificulta la adquisición de éstos de una forma rápida, por esto la alternativa escogida fue que la empresa que provee los instrumentos para esta implementación (SINCRON) nos brindara este instrumento con todas las garantías asociadas al mantenimiento.

3.2.2 Actuadores.

3.2.2.1 Válvula.

La válvula de control cuenta con cuerpo de acero, montada sobre la tubería de bifurcación, caracterizada por ser accesible para el mantenimiento. Este dispositivo actuador es una válvula TRIAC Control Serie EMI-300E (figura 3.8), cuenta con motorización eléctrica, con una escala graduada y reversible, con las palabras ABIERTO – CERRADO que indican los límites de carrera.

Como es una válvula de regulación, la señal del posicionador será activa, cumple con las características generales. Su señal de control y de retroalimentación es 4-20 mA, permitiendo con esta dar la posición de la válvula. [30]



Figura 3.8 Válvula TRIAC Control Serie EMI-300E

Estas son algunas de las características que presenta la válvula:

- Par – Torque: 310 In-Lbs – 35 Nm.
- Tiempo operativo: 12 segundos.

- Recorrido de la válvula: 90 grados.
- Señal de control de posición y Señal de retroalimentación: 4-20 mA
- Potencia del motor: 10 W

Criterio para la selección: ésta válvula proporciona todas las condiciones especificadas para el optimo funcionamiento del sistema, además proporciona robustez y seguridad en el trabajo porque es una de las pocas de su clase con un tiempo de apertura o cierre de 12 segundos, proporcionando una respuesta a los cambios mas rápido.

3.2.2.2 Regulador de velocidad por frecuencia para el grupo hidroenergético.

Como elemento actuador sobre la velocidad del motor que impulsa la bomba, se cuenta con un regulador de frecuencia, modelo 3G3RX-A4185 de la marca OMRON (figura 3.9), el cual es trifásico a un voltaje 200 V AC, este regulador se encuentra instalado entre el contacto C1 y la motobomba, lo que hace que solo se energice cuando entre en funcionamiento la motobomba.

Para el laboratorio éste cumple la función de regular la frecuencia (0 Hz hasta 65 Hz) permitiendo con esto cambiar la altura neta con la cual funciona el laboratorio.



Figura 3.9 Regulador de frecuencia, 3G3RX-A4185 OMRON

3.2.3 Equipo de control.

Como se mencionó en el apartado 3.1, el encargado de cumplir con esta misión es el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22, el cual es un PAC que proporciona ventajas en la comunicación para la aplicación del control del laboratorio, porque solo no se comunica

con los elementos ubicados en la planta sino que también cuenta con la conexión remota a través de la red de Internet.

El controlador cuenta con dos secciones, las cuales son:

- Sección de control: la encargada de guardar y ejecutar las estrategias de control.
- Sección de I/O: espacio basado en un mapeo de memoria, el cual tiene dos áreas de memoria diferente.
 - Área de memoria fija (entradas y salidas I/O).
 - Área de memoria Scratch Pad (variables y programa que se ejecutan en el controlador)

Manejo de entradas y salidas en el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22: como se determinó en los criterios generales las señales normalizadas son conexión 4 a 20 mA y -10/+10VDC, estas señales son llevadas al controlador a través de módulos de entradas/salidas digitales y análogos. De acuerdo a la cantidad de señales manejadas en el sistema SGEH, se hace necesario tener los siguientes módulos que aparecen en la figura 3.10 y en la figura 3.11 se muestran los módulos con sus respectivos elementos asociados (sensores y actuadores).



Figura 3.10 Módulos de entrada/salida del PAC.

0. Modulo de entradas análogas de corriente SNAP-AIMA-4
1. Modulo de salidas análogas D/A SNAP-AOA-23
2. Modulo de entradas análogas de voltaje SNAP-AIV-4
3. Modulo de comunicación serial RS-485 SNAP-SCM-485-422
4. Modulo de entradas Digitales SNAP IAC5A
5. Modulo de salidas Digitales SNAP ODC5-i
6. Modulo de entradas análogas de voltaje SNAP-AIV-4

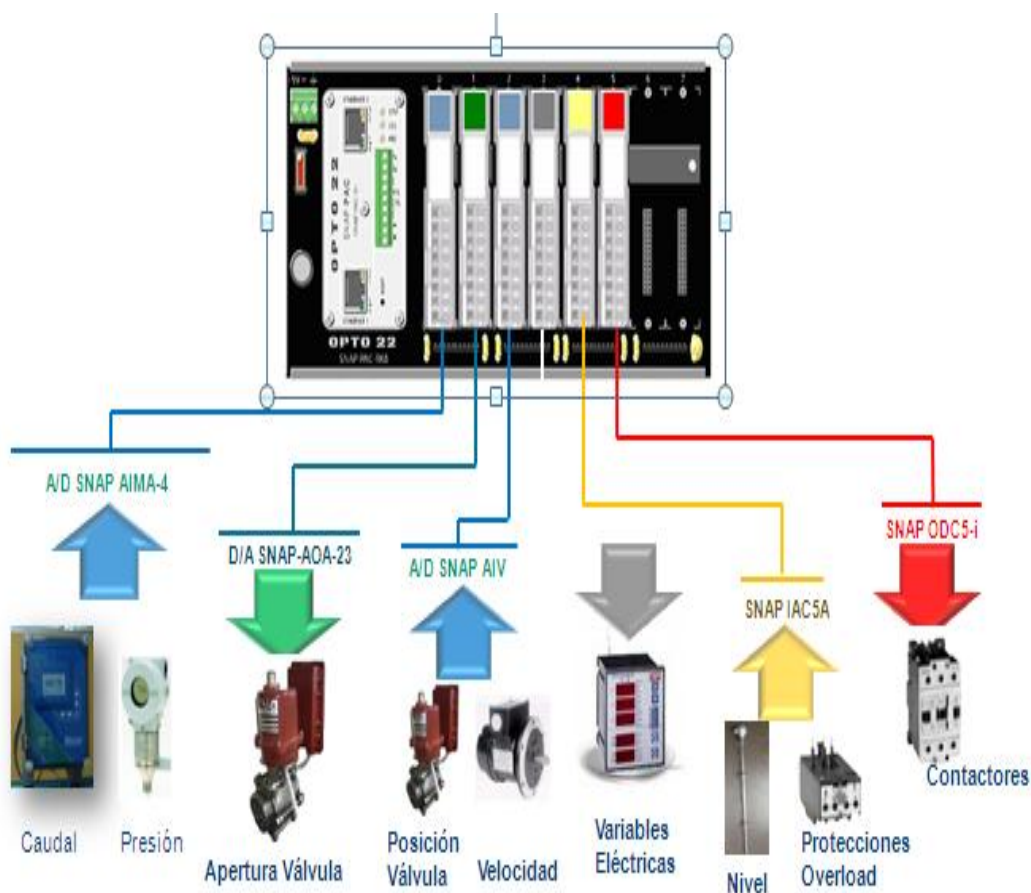


Figura 3.11 Conexión del PAC opto 22 a los instrumentos y elementos de control. [25]

En la tabla 3.2 se indica como están conectadas las diferentes señales a los módulos de entradas y salidas del SNAP, que son proporcionadas por los equipos de campo, también aparece el tipo de señal.

Tabla 3.2 Módulos de entradas y salidas de SNAP PAC

MÓDULO SNAP	SLOT	VARIABLES	DISPOSITIVO DE CAMPO	TIPO
A/D SNAP 0 AIMA-4		Presión Bomba	Transmisor LD291	Entrada Análoga 4-20 mA
		Presión Turbina	Transmisor LD291	
		Caudal	Medidor DFM 5.0	
D/A SNAP-AOA-23	1	Apertura Válvula	Válvula TRIAC Control Serie EMI-300E con actuador eléctrico	Salida Análoga 4-20 mA
A/D SNAP AIV	2	Velocidad Generador	Taco generador RE.0444R	Entrada Análoga 0 – 10 Volt
		Posición Válvula	Válvula TRIAC Control Serie EMI-300E con actuador eléctrico	
SNAP-SCM-485-422	3	Parámetros Eléctricos	Medidor Lovato DMK22	Comunicación Digital RS 485
SNAP IAC5A	4	Nivel Agua Bajo	Indicador de nivel con Reed-Switch	Entrada Digital 120 VAC/VDC
		Nivel Agua Alto	Indicador de nivel con Reed-Switch	
		Sobre Corriente Generador	Contacto Auxiliar Contactor	
		Sobre corriente Bomba	Contacto Auxiliar Contactor	
SNAP ODC5-i	5	Control Contactor Motobomba	Contactor Lovato BF65	Salida Digital aislada 5 – 60 VDC
		Control Contactor Red	Contactor General Electric CR306CO	
		Control Contactor Medidor Lovato	Contactor Lovato BF32	

3.3 Ajuste de las variables de los instrumentos asociadas al sistema.

En este apartado se hará una descripción general, de los proceso de ajuste de las variables de cada uno de los elementos sensores y actuadores en el sistema de generación permitiendo con esto un correcto funcionamiento.

3.3.1 Caudal (medidor de flujo DFM 5.0)

El medidor de flujo utilizado en esta aplicación, cuenta con un panel frontal donde se realizan los respectivos ajustes del instrumento, para realizar esta función se debe acceder a los menús de configuración de la siguiente forma:

- Procedemos a introducir las unidades necesarias para determinar los parámetros de trabajo en el Units/Mode:
 1. Units/Mode: Mode → Flow, este permite mostrar el flujo en unidades de ingeniería
 2. Units/Mode: Linear → in, introducimos la unidad de medida la tubería (pulgadas)
 3. Units/Mode: Volume → L, unidad en que se mide el volumen (Litros).
 4. Units/Mode: Time → Min, unidad en la que se mide el tiempo (Minutos).
- Con lo anteriormente realizado procedemos a introducir los valores de calibración, como a parecen en la tabla 3.3 que son necesarios para un correcto funcionamiento del sensor.

Tabla 3.3 Valores para calibración del sensor DFM 5.0

Calibración	Valor
valor máximo	20 mA → 1000 L/Min
valor mínimo	4 mA → 0 L/Min
diámetro de la tubería	Pipe ID → 3 in

3.3.2 Nivel (reeds switches)

El sensor de nivel del tanque principal, como consta de dos flotadores que dependiendo de su posición informan su estado (apagado – encendido) los ajustes se realizan de forma completamente experimental, de la siguiente manera: el tanque fue llenado a su capacidad máxima y se colocó a trabajar el sistema, permitiendo de esta forma la

determinación de las respectivas medidas para el nivel mínimo (0.8 metros) y máximo (1.2 metros).

3.3.3 Presión (Transmisor inteligente de presión LD 291)

Estos transmisores cuentan con indicador local (pantalla) y se encuentran configurados de fábrica para ser ajustados localmente por medio de un destornillador magnético como se puede observar en la figura 3.12. Introduciéndose en el menú de configuración como aparece en el manual de instrucciones, operación y mantenimiento del instrumento [31].

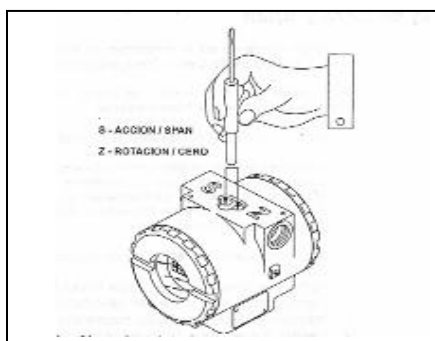


Figura 3.12. Ajuste local de cero y span [26]

Este ajuste local usa una estructura de árbol (figura 3.13.) donde ubicando el destornillador magnético en Z es posible observar las opciones de una rama y ubicando dicha herramienta en S, se obtienen detalles de la opción seleccionada.

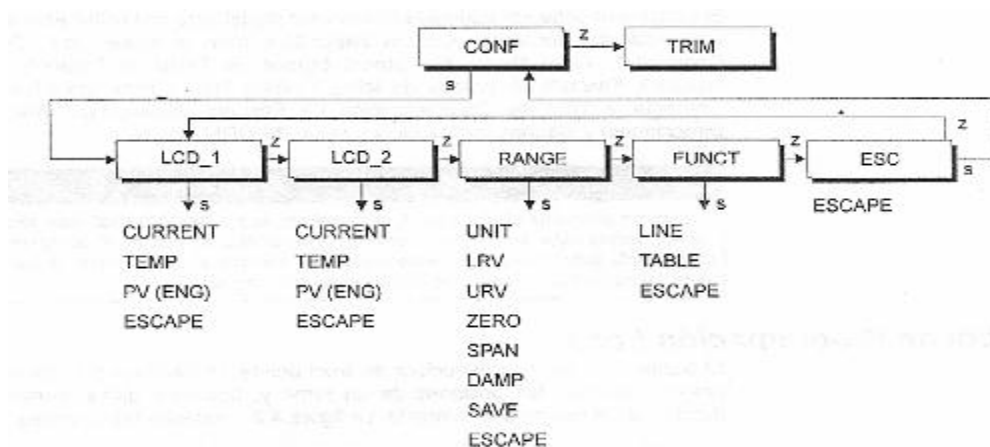


Figura 3.13. Rama CONF con las opciones para el ajuste [26]

En el menú de configuración con S se conmuta a la rama, empezando con la función display 1 (LCD_1) y luego a la función display 2 (LCD_2), asignándoles un rango de trabajo como aparece a continuación:

- Display 1 (LCD_1):
Rango de trabajo= 0 a 100 psi sin referencia alguna.
CO (salida de corriente)= en mA
- Display 2 (LCD_2)
Rango de trabajo= 0 a 100 psi sin referencia alguna.
PV (Variable del proceso)= unidades inglesas (eng. Unit)

Luego oprimiendo Z se desplaza a la función rango (FUNCT de la rama CONF). Y en éste ajustamos los siguientes parámetros:

- Unidad (UNIT) → Psi (libras por centímetro cuadrado), como unidades de medición
- Función reduce (LRV) → 0, valor inferior sin referencia
- Función reduce (URV) → 100, valor superior sin referencia.

3.3.4 Velocidad del generador (REO444R)

El ajuste de la señal de voltaje que proporciona el tacogenerador, según su fabricante y de acuerdo a las especificaciones del comportamiento de éste, la señal de salida proporciona 0.006 voltios por cada rpm. El sistema cuenta con un motor asíncrono de 4 polos, lo que proporciona que la velocidad sincrónica para trabajar en el régimen de generador es una velocidad de 1800 rpm, y por esto la salida de voltaje del tacogenerador será de 10.8 voltios, lo que supera el valor de medición para el modulo de adquisición SNAP-AIV (-10/+10 volt), por esta razón se realiza un acondicionamiento a la señal, por medio de un divisor de voltaje de relación 2/3, dándonos la nueva señal un valor de 7.2 voltios cuando se trabaja a 1800 rpm.

3.3.5 Variables eléctricas (Medidor Lovato DMK 22).

Dado que la corriente nominal para el motor es de 19.77 AMP y ésta supera el rango de trabajo del equipo (0 a 6 amperios), entonces para esta señal se hizo necesario la utilización de transformadores de corriente los cuales presentan una relación de 10 a 1 por fase, con lo cual se modificó el valor del parámetro (P.X1). A continuación en la tabla 3.4 se hace un resumen de las variables que fueron modificadas.

Tabla 3.4 Variables modificadas en el Lovato DMK 22

parámetro	Descripción	Rango	Valor
P 41	Dirección	1 - 255	8
P 42	Velocidad de transmisión	1200 - 2400 - 4800 - 9600 - 19200	19200

3.3.6 Equipo de control (SNAP PAC-R1 DE OPTO22)

Para ser conectado al PC o a una LAN existente se utiliza un cable de red cruzado de forma directa. Para realizar esta función se le debe asignar una dirección IP, la máscara de subred y la puerta de enlace. En la tabla 3.5 se muestra la información de dirección asignada.

Tabla 3.5 Direcciones asignadas al controlador

Controlador SNAP PAC – R1 OPTO 22	
Dirección IP	192.168.200.10
Máscara de subred	255.255.255.0
Puerta de enlace	0.0.0.0
Dirección DNS	0.0.0.0

4. SISTEMA DE CONTROL EN EL LABORATORIO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA (SGEH)

La funcionalidad y naturaleza del sistema de control en el SGEH esta relacionado con los criterios, grado y tipo de automatización implementada, para cumplir con un grado alto de efectividad, todo esto está enmarcado en la norma Std IEEE 1010 de 1987.

El laboratorio de pequeñas centrales de la universidad del Valle dispone de un sistema de control (SC), el cual cuenta con un módulo de control que esta dotado de:

- Un CPU, que cumple la función de servidor.
- Punto de conexión para TCP/IP.
- Alimentación regulada y no regulada.
- Sincronización de reloj interno mediante señal digital.
- Software especializado para el manejo de estrategias de control (PAC PROJECT)

Las funciones del sistema de control son adquisición, tratamiento, control, visualización, registro y manipulación de las variables del proceso.

- Adquisición y tratamiento de información: la adquisición de la información se realiza a través de los sensores instalados en la planta y éstos son análogos o digitales. Las señales que éstos entregan son llevadas al controlador por medio de los módulos de comunicación, para que se realicen las funciones designadas por el sistema.
- Visualización, registro y manipulación de las variables de proceso: las señales o datos obtenidos son llevadas a la estrategia donde se comparan con los valores de referencia de la operación del sistema y con estas se realizan las acciones necesarias para mantener el control y la protección del SGEH.
- Control del proceso SGEH: esta acción es llevada acabo por la estrategia implementada en el sistema y pude ser automática, semiautomática o manual.

El sistema de control permite la definición mediante lenguaje de programación (lenguaje dirigido a objetos, texto estructurado, diagramas lógicos, esquemas de contacto, etc.), de secuencias o rutinas y dispone de un tamaño ampliable de memoria de almacenamiento. A continuación se encuentra definido las necesidades generales del sistema de control.

1. Rapidez de respuesta para adaptarse al cambio.
2. Flexibilidad de las arquitecturas de automatización.
3. Capacidad de captación y análisis de la información.
4. Abertura e interacción de los sistemas tradicionales.
5. Coordinación entre los componentes del proceso.

En los sistemas de control moderno se considera al centro de control como el conjunto de ordenadores, periféricos y los subsistemas de entrada/salida que permiten al operador monitorizar el estado actual del sistema y controlarlo [32].

Para la descripción de las diferentes partes que conforman el control (figura 4.1) se debe considerar básicamente tres subsistemas y que son los siguientes: subsistema de ordenadores, subsistema de software y subsistema de hombre máquina.

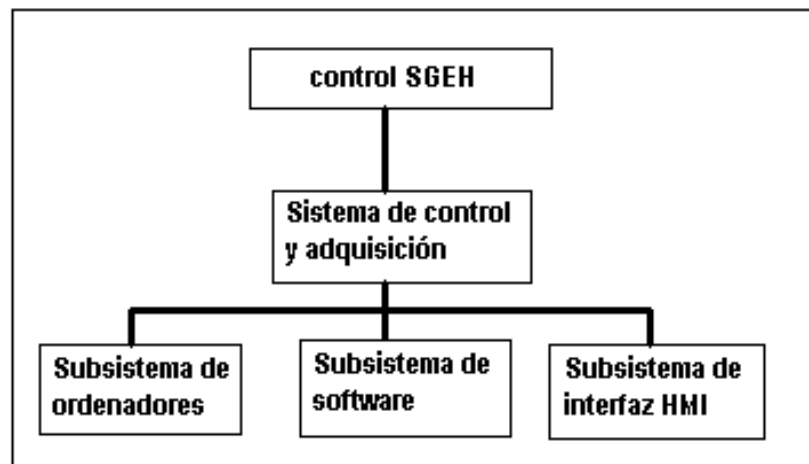


Figura 4.1 Estructura del sistema de control.

4.1 Subsistema de Ordenadores.

El subsistema de ordenadores es la herramienta para llevar a cabo las tareas de control y supervisión. Es el elemento básico que controla el proceso del sistema SGEH, la recopilación y análisis de los datos obtenidos, la creación de operaciones de registro y la actualización de los datos presentados en los monitores. El sistema emplea un procesador que cumple con la norma IEEE 1003.1 – 1988, denominada de tiempo real.

4.1.1 Equipos de la sala de control.

La sala de control cuenta con un Desktop Hewlett Packard pavilion TV PC, de tipo sobremesa o estacionario, compatible con Windows XP, apto para aplicaciones de tiempo real, multiusuario y multimedia, orientado a redes, orientado a gráficos y a despliegues normalizados. Este sistema operativo cumple con las definiciones OSF/1 (open software foundation) así como las especificaciones interfaz de programación (application environment specification OSF/AES). El equipo dispone de las siguientes características:

- 4GB de memoria RAM.
- Procesador Athlon Phenom X4.
- Board NVidia.
- 320 GB disco duro.
- Tarjeta de red 10/100 Mbps para que en una LAN independiente se comunica única y exclusivamente con el PAC.

El sistema opera con los protocolos normalizados de la familia TCP/IP. La interconexión de la máquina a la red cumple con las normas IEEE 802.3 (Ethernet).

4.2 Subsistema de software.

El subsistema de software del sistema de control esta formado por un conjunto de programas de aplicación que se ejecutan de acuerdo con el sistema operativo del sistema, en un ordenador multitarea. Este conjunto de programas para nuestro caso es el PAC Proyecto Software de Opto 22.

4.2.1 Software especializado para el manejo y creación de la estrategia de control (PAC PROJECT).

El PAC Proyecto Software de Opto 22 proporciona todas las aplicaciones que se necesitan para la automatización, control remoto y aplicaciones de adquisición de datos en el SGEH. Uno de los cuatro componentes de la PAC Sistema de SNAP, el PAC del proyecto software está completamente integrado con los controladores de SNAP PAC y los sensores.

El PAC Project incluye lo siguiente:

- PAC Control Professional, una herramienta basada en diagramas de flujo para desarrollar programas de control para correrlos en los controladores SNAP PAC. Como se muestra en la figura 4.2.

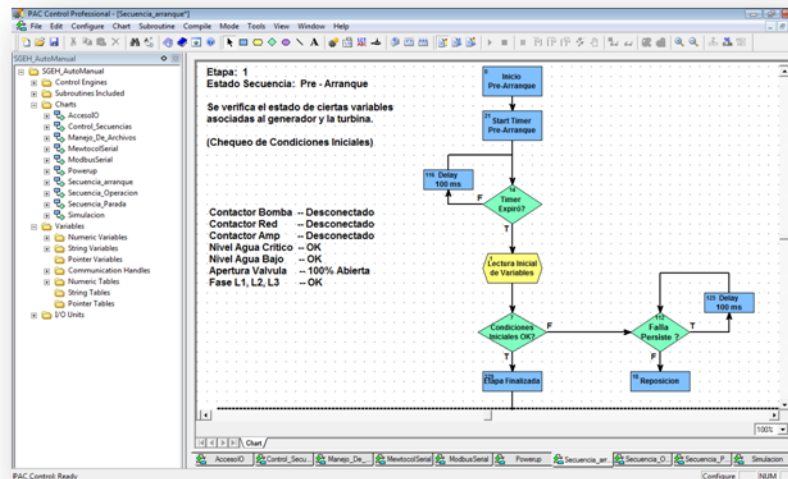


Figura 4.2 Entorno de programación PAC Control. [34]

- PAC Display Professional, para crear interfaces hombre-máquina (HMIs) para permitir a operadores y técnicos monitorear e interactuar con el Sistema SNAP PAC. (figura 4.3), proporcionándole información en tiempo real e históricos al operador acerca del desempeño de las diferentes etapas de un proceso [33].

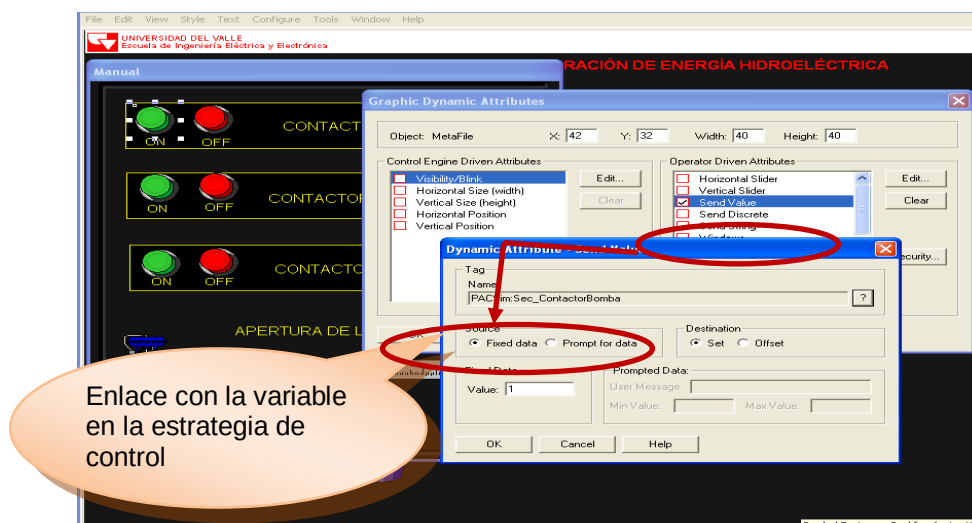


Figura 4.3 Elementos del PAC Display Configurator. [34]

- PAC Manager, un útil programa para configurar y mantener los controladores, brains y módulos de I/O de SNAP PAC.
- OptoOPCServer, un rápido y eficiente servidor para comunicaciones con todos los clientes de OPC 2.0.
- OptoDataLink, para compartir datos del Sistema SNAP PAC con bases de datos comunmente utilizadas como Microsoft(R) SQL Server, Microsoft Access, y MySQL. Este programa se encarga de actualizar la base de datos cada intervalo de tiempo definido por el usuario y permite a la vez escribir datos en el controlador PAC provenientes de la base de datos y según sea la actualización que se determine, esta puede ser periódica o por eventos que se ejecute.

En la figura 4.4 se puede ver como el complemento Opto Datalink sirve de enlace para comunicar las variables del PAC hacia la base de datos y viceversa.

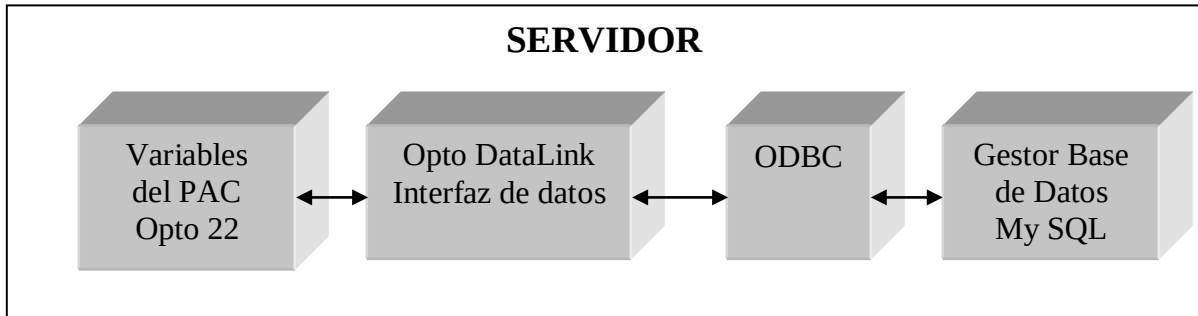


Figura 4.4. Opto DataLink en el servidor.

4.3 Arquitectura del sistema SGEH.

El presente apartado tiene como objetivo mostrar la arquitectura implementada para el sistema de supervisión, adquisición de datos y control del laboratorio de forma que cumple con norma Std IEEE 1010 de 1987. A continuación en la figura 4.5 se muestra el esquema general de la arquitectura del Sistema.

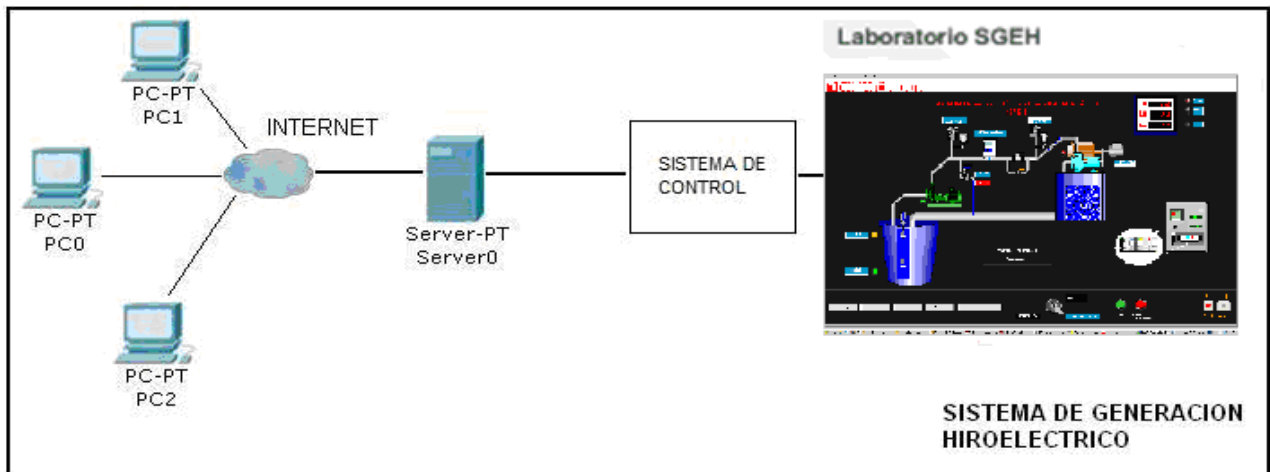


Figura 4.5 Arquitectura del sistema SGEH.

Como se puede distinguir en la figura anterior aparecen los siguientes componentes principales:

- Proceso.
- Sensores y actuadores.
- Controlador (PAC).
- Servidor.
- Lan Univalle (Ethernet).
- Comunicación para el exterior por TCP/IP (Internet).

Los protocolos de comunicación utilizados para el sistema de generación soportan la norma UNE 61850. En la figura 4.6 aparecen los diferentes módulos y los elementos que están conectados a estos. Para el bus de campo convencional el sistema permite tener protocolos tipo Profibus, Fielbus o ModBus TCP/IP. En la figura 4.7 se muestran los niveles que se involucran en los sistemas de información.

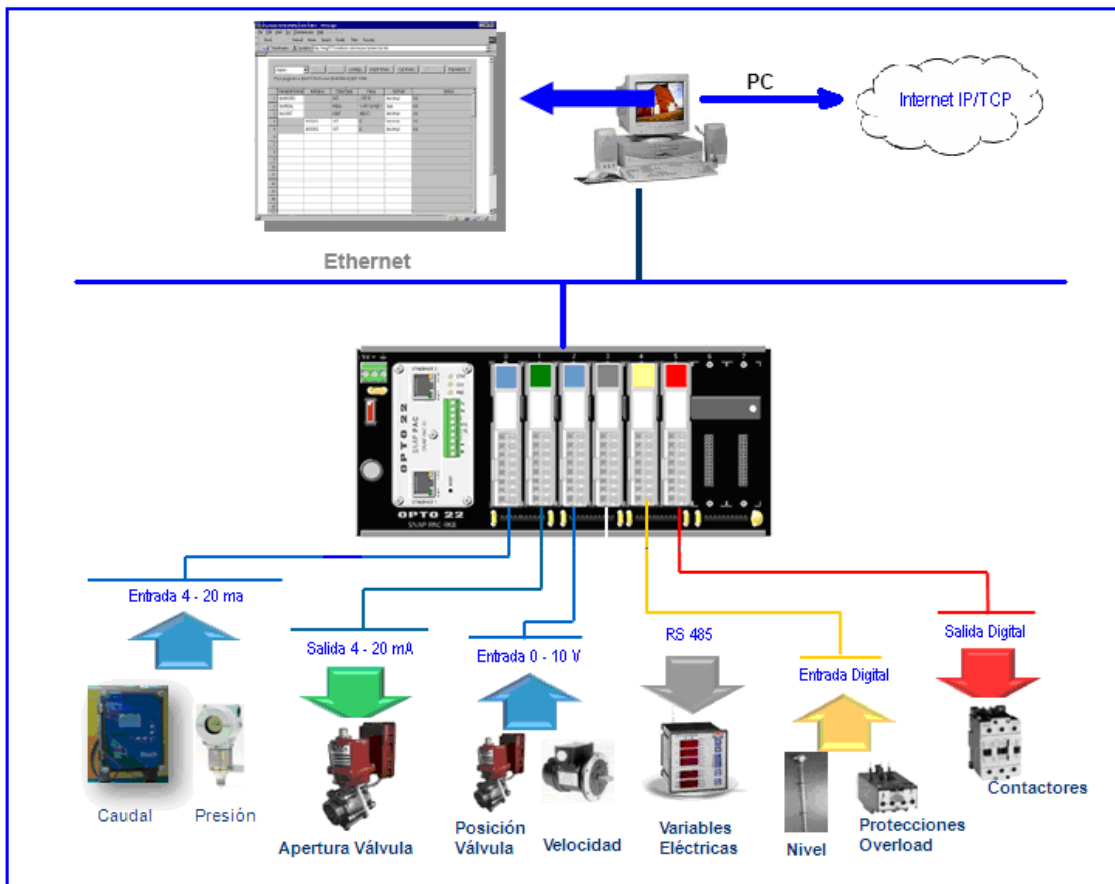


Figura 4.6 Arquitectura de comunicación de los diferentes elementos del sistema.

Integración de la Automatización Industrial.

Dada la evolución en la competencia del sector de los sistemas de generación, este necesita cada vez más sistemas de información que permitan adaptarse al cambio, de forma efectiva y rápida.

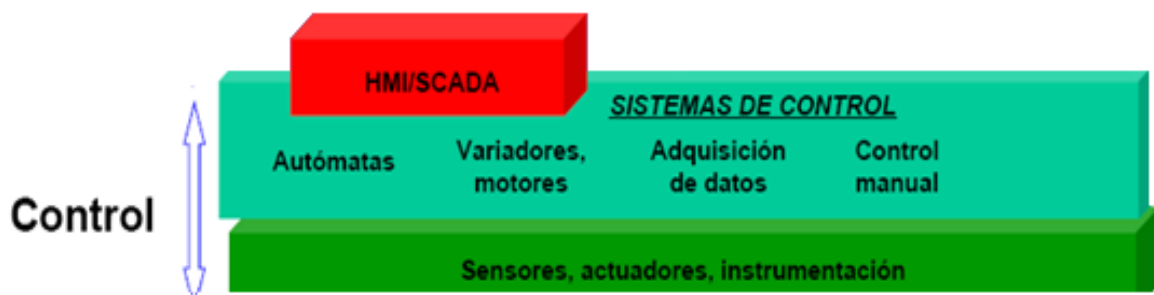


Figura 4.7 Arquitectura proyectada para el sistema de control

La arquitectura del sistema de control para el SGEH, está estructurada según las áreas funcionales, a saber:

- Operación.
- Control.
- Proceso

4.3.1. Operación.

El área de operación se ubicará en el laboratorio. Desde el espacio de trabajo se realizan, entre otras, las siguientes funciones:

- Control de generación.
- Sincronización automática del grupo.
- Visualización de estados.
- Visualización de medidas, gráficas e históricos.
- Visualización y gestión de alarmas y eventos.
- Maniobras de operación.
- Visualización de estados de los sensores y demás elementos del SGEH.
- Mantenimiento de pantallas y resto de elementos del SGEH.

4.3.2 Control.

Esta parte de la arquitectura se encuentra ubicada en el equipo que cumple la función de servidor, en el cual se encuentra el Software especializado para el manejo de estrategias de control (PAC PROJECT). Como se muestra en la figura 4.8 el sistema de control incluye diferentes estructuras de software para realizar las diferentes tareas del control. En este trabajo solo nos referiremos a las dos primeras estructuras:

1. La interfaz hombre – máquina, para el manejo de la estrategia de control.
2. La construcción de la estrategia de control en el PAC PROJECT.

Se debe mencionar que la interfaz para manejo del laboratorio vía Web, que hace parte del proyecto macro (Interfaz hardware/software para el monitoreo remoto de variables en sistemas de generación de energía hidroeléctrica) no es descrita aquí porque no hace parte directa de esta investigación; pero si indirectamente por que es la que utiliza la herramienta opto datalink para tomar las señales y controlar el sistema con las estrategias

de control del PAC; además se le prestó asesoría en los conceptos y aplicaciones técnicas del manejo de una central.

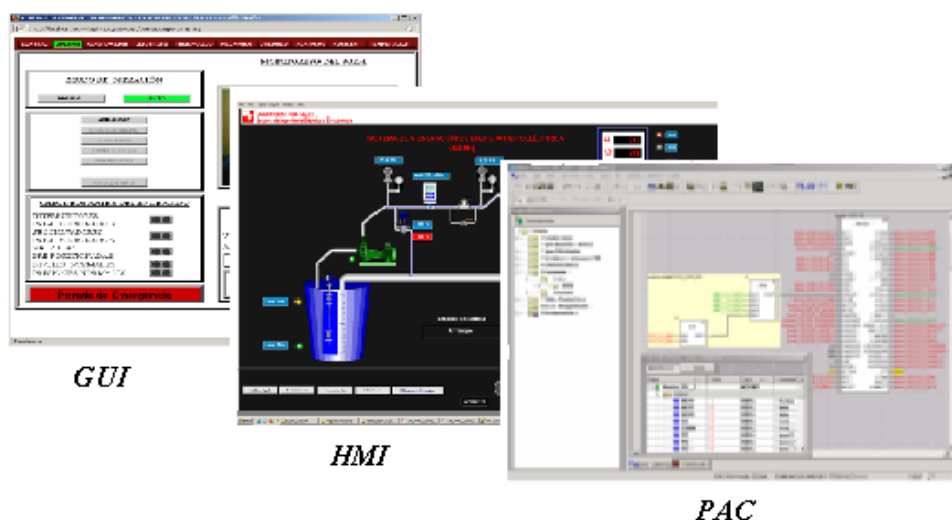


Figura 4.8 Estructuras de software para realizar el control.

4.3.3 Proceso.

El sistema de control consta de un controlador, para la unidad. El controlador tiene capacidad para el procesamiento analógico, digital y para el control lógico, además de funciones de supervisión, de adquisición y comunicación. El controlador dispone de puerto de Ethernet local que permite la comunicación sobre la red de área local (LAN). El operador y el controlador se comunican entre sí utilizando Ethernet servidor/cliente.

4.4 Configuración de los niveles jerárquicos del sistema de control y supervisión.

La configuración del sistema de control es digital distribuido, con una estructura de niveles jerárquicos como se describe a continuación. Los diferentes niveles se definen teniendo en cuenta los distintos sitios de operación y su funcionalidad. En el laboratorio solo integra los primeros tres niveles de control.

4.4.1 Primer nivel de control.

Esté nivel comprende los siguientes equipos primarios: turbina pelton, bomba como turbina, generador asíncrono, válvula motorizada, motor e interruptores; desde los cuales se realizarán operaciones de mantenimiento o de emergencia. Así mismo forman parte de este nivel los dispositivos de instrumentación y medida: sensores, controladores y actuadores, asociados a los equipos primarios, los cuales permiten la comunicación con el siguiente nivel de control por medio de conexión 4 a 20 mA y -10/+10VDC.

4.4.2 Segundo nivel de control.

El segundo nivel comprende el sistema de control de la unidad, que se basa en el controlador SNAP PAC R1 OPTO 22. Este nivel soporta todas las secuencias de control (manual, semiautomático y automático), enclavamientos, bloqueos y protecciones para el funcionamiento de la unidad de generación, bien sea localmente utilizando los automatismos para gobernar directamente los dispositivos primarios o por medio de órdenes externas remotas desde los computadores. El sistema tiene una interfaz hombre-máquina (HMI) construida en el entorno del PAC PROJECT (CORREA F y GARCIA A [34]).

4.4.3 Tercer nivel de control.

El tercer nivel lo constituyen el equipos de control del laboratorio, compuesto por la estación de operación y gestión de planta, con la interfaz hombre-máquina, desde donde se realizan las funciones de control, supervisión y adquisición de datos de los procesos de planta. Estos equipos están ubicados en la sala de control y operación del laboratorio.

4.5 Comunicaciones.

4.5.1 Comunicaciones entre niveles 1 y 2.

La comunicación entre los equipos de los niveles de control primero y segundo se realizará mediante una red para la instrumentación inteligente y mediante señales convencionales de Entrada / Salida; el computador de control del sistema de generación de planta se conectarán a los diferentes automatismos e IEDs de este nivel mediante comunicación serial a través de los protocolos estándar 4 – 20 mA, 10 – 10 V, RS 232 o RS – 485, y mediante señales convencionales de Entrada / Salida.

4.5.2 Comunicaciones entre niveles 2 y 3.

La comunicación entre los equipos de los niveles de control segundo y tercero se realizará mediante el protocolo abierto estándar TCP/IP, sobre una red ETHERNET industrial de área local (LAN) de 100 Mbps, la cual tiene la interfaz de red requerida y los acopladores de red para el computadores de control de planta, de operación y gestión de planta, de acuerdo con la norma IEEE 802.3.

4.6 Interfaz hombre –máquina (HMI).

La función básica de la interfaz hombre-máquina (HMI) es el de presentar un entorno de usuario fácil de usar, que permite tener acceso a una variedad de ventanas, además garantiza unos tiempos de respuesta adecuados y finalmente que integra gráficos del proceso [35]. La presentación gráfica esta ajustada a los estándares X-Windows, con la funcionalidad de poder presentar múltiples ventanas en la misma pantalla.

Para la explotación del laboratorio se dispone de una representación gráfica (interfaz gráfica) donde para la construcción de HMI se tuvo en cuenta:

- Que de una pantalla a la otra se pueda navegar sin necesidad de regresar a la primera, como se muestra en la figura 4.9.
- Para lograr lo anterior se necesita que todas las ventanas o pantallas tengan en la parte inferior unos botones, que permitan el trasladarse de una a otra.
- La necesidad de tener en la parte inferior de todas las ventanas un panel para la selección del modo de arranque y parada del sistema; botones que permitan en todas las pantallas grabar los datos de las variables que intervienen en el proceso.
- Que se ejecuten mandos sobre dispositivos.
- Introducir valores manuales para cualquier tipo de señal.
- Definir y solicitar gráficas de tiempo real e histórico.

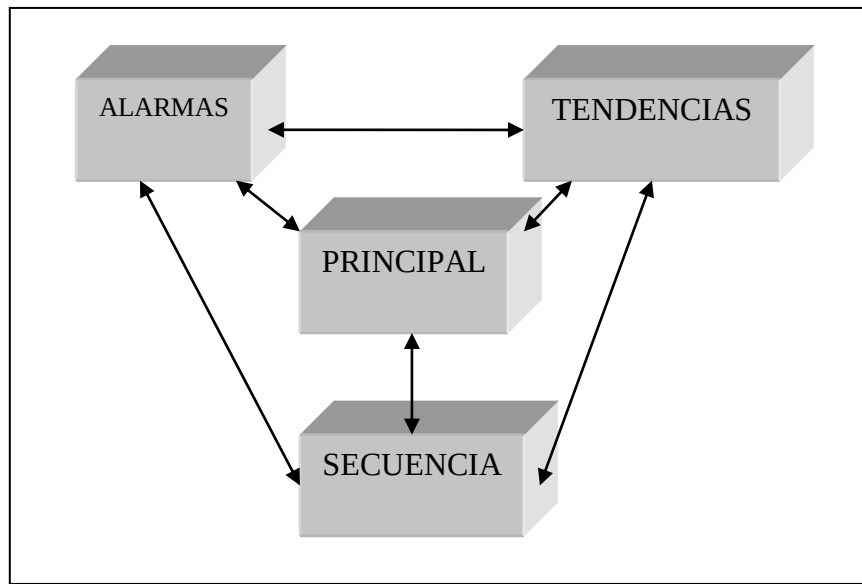


Figura 4.9 Secuencia de paso de una ventana a otra.

Pantalla principal:

- Las pantallas de proceso son representaciones gráficas mediante símbolos del equipamiento existente en campo.
- El flujo del proceso será de izquierda a derecha y de arriba abajo.
- Se indica el estado del equipo mediante colores y se presentarán junto al símbolo las medidas asociadas disponibles.
- Dispondrá de simbología asociada al mando para la realización de maniobras.
- En el diagrama de proceso se presentará la información dinámica del proceso de una manera que no sea ambigua, de forma tal que el punto de proceso definido por la variable esté definida claramente. En cada dato se definirán, si procede, un valor, indicación de estado y unidad de medida.

Pantalla de secuencias:

- Las pantallas de secuencias se organizan por niveles para una mejor comprensión.
- El flujo del proceso será de izquierda a derecha y de arriba abajo.
- Dispondrá de simbología asociada al mando para la realización de maniobras.

- En esta pantalla se debe colocar un panel que muestre en tiempo real la información de las variables, que intervienen en el proceso.

Pantallas de Alarmas:

- El operador puede consultar y gestionar el estado de alarmas.
- Es una pantalla de texto donde se presenta la etiqueta de fecha y hora, un descriptivo de la alarma o evento y la identificación o TAG de la alarma.
- Se tiene una capacidad de almacenamiento de las últimas alarmas, que pueden ser visualizadas en la pantalla de histórico de alarmas.
- En esta pantalla se debe colocar un panel que muestre en tiempo real la información de las variables, que intervienen en el proceso.

Grupos de Tendencias:

- Un grupo de tendencia será aquel que agrupe variables de proceso funcionalmente relacionadas.
- Se elaboran curvas de tendencia de las variables analógicas y digitales en gráficos de curvas multicolor y con base de tiempos en el eje de abscisas y valores de variables en el eje de ordenadas.
- En esta pantalla se debe colocar un panel que muestre en tiempo real la información de las variables, que intervienen en el proceso.

Históricos:

- Se cuenta con una unidad de memoria (UA) para el almacenamiento masivo de datos de operación de la planta.
- Es posible extraer datos del disco duro para presentar las tendencias de los datos almacenados.
- La capacidad de almacenamiento será suficiente para mantener toda la base de datos de los sistemas así como para el almacenamiento de datos históricos, para las variables exploradas.

4.6.1 Programa de diálogo hombre – máquina.

Este programa permite al operador del laboratorio visualizar el estado de la red y actuar sobre ella para controlarla. La aplicación de PAC PROJECT, permite la interacción del control y el almacenamiento de datos en la base para este fin. Así el administrador del sistema podrá solicitar distintas pantallas de información:

- Puede crear o editar pantallas ya existentes.
- Puede señalar algunos puntos del sistema para poder actualizar sobre ellos.
- Puede controlar el manejo, ejecución y cambios en todos los demás programas de aplicación.

4.7 Análisis de requisitos de la aplicación.

Es importante definir los alcances de la interfaz, para este punto se debe tener en cuenta los objetivos básicos de la aplicación y lo que el usuario puede hacer con ella, para esto se enumeran los diferentes requerimientos no funcionales y funcionales.

4.7.1 No funcionales:

1. El funcionamiento del laboratorio esta enmarcado en las normas IEEE 1010 y 1020.
2. Registrar operaciones hechas por el sistema (rastros de operación del laboratorio).
3. Animar encendido-apagado de los componentes del laboratorio de SGEH.
4. Ambientar la página con gráficas del sistema de generación hidroeléctrico.
5. Permitir el acceso a la interfaz de operación del sistema a un solo usuario al tiempo.
6. El sistema de control revisa las señales que proporcionan los sensores y actuadores y determina su estado óptimo para el arranque, de acuerdo a unos valores establecidos.
7. El sistema de control debe revisar cada segundo las variables actuantes en el proceso para poder determinar si existen errores.
8. El sistema de control debe enviar las variables actuantes en el proceso, a una interfaz que actúa sobre él y controla la central a través del internet.
9. El sistema determina las fallas y procede a realizar la operación necesaria para el paro.
10. Los lazos de control tanto para la velocidad como para la potencia a generar no son accesibles en la interfaz al usuario.

- **Niveles de seguridad de inicio y finalización de encendido de la planta:**
- El operador debe iniciar sesión exitosamente.
- El operador no podrá iniciar varias ventanas para el manejo del sistema.
- El operador deberá estar debidamente entrenado para que el pueda acceder a operar el sistema.
- El sistema de control desde la interfaz deberá responder exitosamente al estado de espera para operar la planta (deberá existir una variable “desbloqueo de arranque” que se ponga en 1 cuando el sistema este habilitado pero no está corriendo todavía).
- El sistema de control desde la interfaz local deberá tener un habilitador-des-habilitador de usuario de operación remota.
- Si el operador cierra la interfaz y no apaga la planta ésta procederá a apagarse.
- Si el usuario cierra la aplicación, no se debe dar inicio a la operación de apagado de la planta.
- El sistema debe reconocer falla en los sensores y actuadores, y procederá a apagar la planta.

4.7.2 Funcionales:

1. Permitir al usuario visualizar la planta en tiempo real.
2. Validar el estado de los sistemas para la operación de la planta.
3. Generar graficas de históricos de las variables (presion1, presión2, flujo, revolución del generador, voltajes I1 I2 I3, corrientes I1 I2 I3, potencia) de la planta.
4. Permitir al operador escoger el modo de operación manual, semiautomática o automático.
5. En el modo de operación manual permitir dar el comando de arranque al grupo moto-bomba, apertura de la válvula de control de caudal y conectar el sistema a la red.
6. En el modo de operación semiautomática permitir dar el comando arranque del sistema y a continuación apertura o cierre de la válvula para la sincronización.
7. En el modo de operación semiautomática permitir dar el comando de sincronizar a la planta.
8. En el modo de operación semiautomática permitir dar el comando de conectar a la red a la planta.
9. En el modo de operación automática permitir dar el comando arranque del sistema.

10. Permitir al operador dar el comando de grabado de datos de la operación de la planta en cualquier modo de operación.
11. Permitir variar la potencia entregada a la red con la apertura o cierre de la válvula motorizada en cualquier modo de operación.
12. Permitir la visualización en tiempo real, los datos de presión 1, presión 2, flujo, nivel bajo, nivel alto, torque, revoluciones del generador, voltaje en las líneas I1, I2 y I3, corriente en las líneas I1, I2 y I3, potencia eléctrica activa, potencia reactiva, potencia aparente, fase y frecuencia, en cualquier modo de operación.
13. Permitir al usuario operador, dar órdenes de operación de encendido-apagado del motor de la bomba, conexión desconexión del generador, apertura-cierre de la válvula proporcional bajo ciertas condiciones de la secuencia de arranque según la norma IEEE 1010.
14. Permitir al operador, dar órdenes de operación de apagado de emergencia y automático.
15. Permitir al operador, dar órdenes apertura-cierre de la válvula proporcional.
16. permitir al operador visualizar en cualquier modo de operación la ventana principal, la ventana secuencias, la ventana de tendencias, la ventana de alarmas o fallas y la ventana de configuración de variables de la estrategia.

4.8 Construcción de la interfaz HMI usando la aplicación PAC DISPLAY.

Haciendo uso de la herramienta (PAC Display Configurator Pro) se diseñó una interfaz de usuario la cual combina elementos animados, indicadores numéricos, botones de mando, registro de datos del proceso y configuración de alarmas, los que permiten al usuario operador, realizar el control, adquisición y la supervisión del proceso desde un computador para los tres modos de operación con los que cuenta el sistema: automático, semiautomático y manual. Esta interfaz cuenta con las pantallas relacionadas a continuación:

- Pantalla principal.
- Pantalla de secuencias.
- Pantalla de alarmas.
- Pantalla de tendencias.

4.8.1 Pantalla principal.

El panel principal mostrado en la figura 4.10 se puede encontrar el gráfico general del sistema (1), un panel que permite encontrar las variables de voltaje, corriente y la

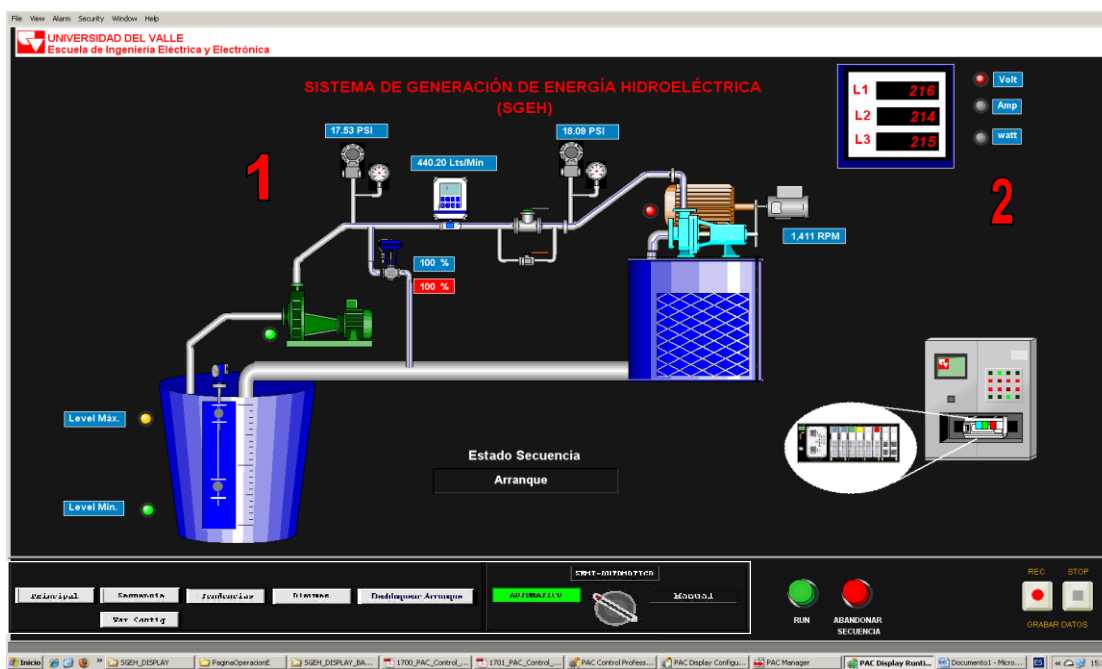


Figura 4.10 Pantalla principal de la interfaz (HMI).

potencia (2), en la parte inferior izquierda los botones que permiten desplazarse por las diferentes ventanas y un botón especial que da vía libre al funcionamiento de la SGEH. En el indicador de valores de la velocidad del motor (figura 4.11).

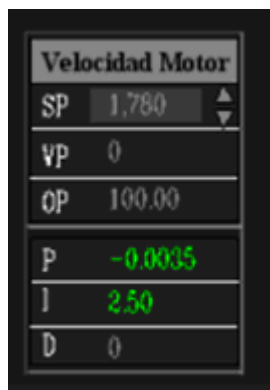


Figura 4.11 Indicador de velocidad del motor.

En el diagrama general se destacan los siguientes elementos:

- Tanque de aguas principal.
- Tanque de aguas turbinadas.
- Sistema de tuberías.
- Motobomba.
- Grupo Turbina-Generador.
- Sensor de nivel.
- Transmisor de presión P1 – Presión Bomba.
- Transmisor de Presión P2 – Presión turbina.
- Sensor de caudal,
- Taco generador.
- Medidor de variables eléctricas.
- Válvula de control.
- Válvula esférica y de Bypass.

En esta pantalla, también podemos encontrar, en la parte inferior derecha como se muestra en la figura 4.12, dos botones que permiten grabar los datos que proporcionan las variables (rev – stop), y centrado un botón que indica el tipo de control con el que va a funcionar la planta (manual, semiautomático o automático), dos pulsadores que permiten arrancar (run) y otro que la detiene (abandonar secuencia).



Figura 4.12 Panel inferior derecho de las ventanas de la HMI.

En la parte inferior izquierda se cuenta con el panel que permite navegar por todas las pantallas o ventanas de la aplicación, adicional a esto se encuentra un botón, que permite bloquear o desbloquear el arranque, como se muestra en la figura 4.13.



Figura 4.13 Panel inferior izquierdo de la HMI.

4.8.2 Pantalla secuencias.

Cuando presionamos el botón secuencia de cualquiera de las ventanas de la interfaz, encontraremos la figura 4.14 que aparece a continuación.



Figura 4.14 Pantalla de secuencias.

En esta podemos encontrar toda la estructura secuencial o estado de funcionamiento del sistema, como se puede observar se encuentra repartida en recuadros de acuerdo al estado de avance de la secuencia (pre-arranque, arranque del sistema, conexión del sistema a la red, operación del sistema y desconexión del sistema). Se debe recordar que de acuerdo al tipo de funcionamiento (manual, semiautomático o automático) en la pantalla de secuencias se puede controlar la apertura de la válvula y la potencia a ser generada.

Además se encuentra en esta pantalla, un panel de medidas de las variables más importantes del funcionamiento del sistema (parte derecha de la pantalla).

4.8.3 Pantalla de tendencias.

En éste se pueden observar los comportamientos gráficos de las variables del sistema en tiempo real, de las variables eléctricas, mecánicas e hidráulicas. La pantalla de tendencias que podemos observar en la figura 4.15, se compone de dos supertrend, que permiten la visualización de las diferentes curvas (el de la parte superior variables hidráulicas y mecánicas y el de la parte inferior los parámetros eléctricos).

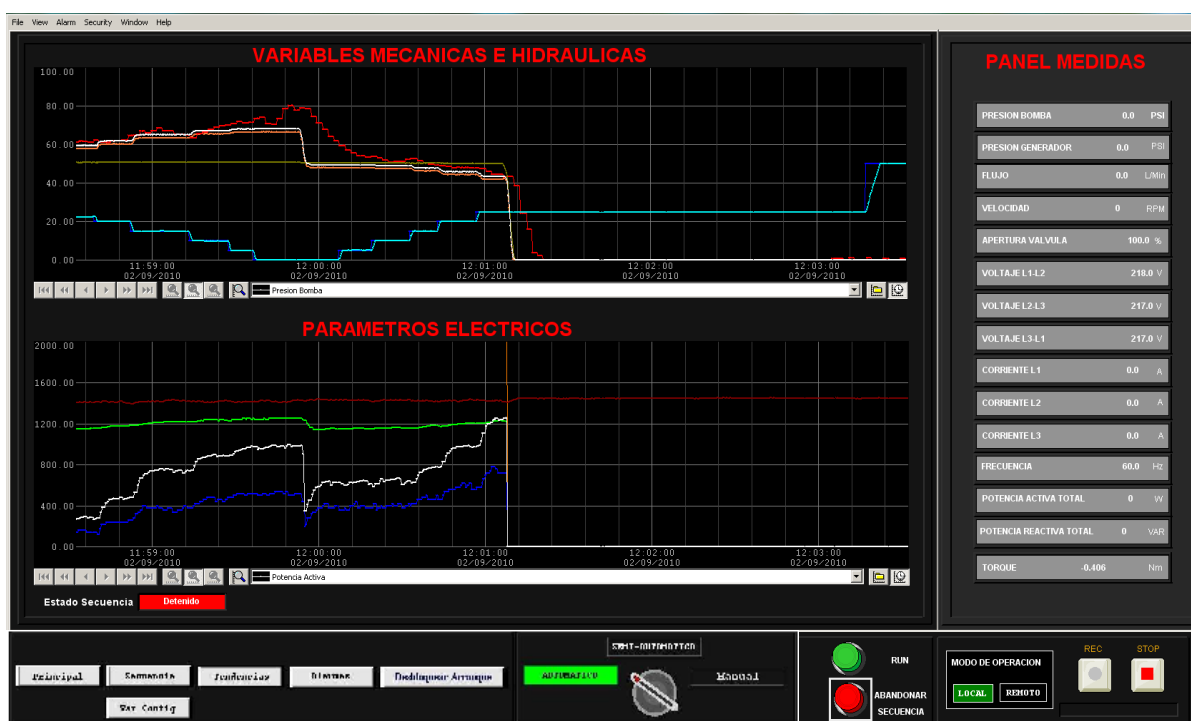


Figura 4.15 pantalla de tendencias.

Como ya se mencionó anteriormente todas las pantallas tienen los paneles inferiores, y este al igual que la pantalla de secuencias cuenta con el panel de medidas.

4.8.4 Pantalla de alarmas.

En esta pantalla (figura 4.16) se encuentran especificadas las alarmas más importantes del sistema; cuando se presenta alguna anomalía en el funcionamiento de la planta, se coloca de color rojo sobre esta para dar una información visual y además en el cuadro de históricos se registra la alarma o alarmas que se presentan.

En el momento de presentarse una falla y luego de haber realizado las revisiones y ajustes necesarios en el sistema el operario debe “limpiar” la falla presionando el botón limpiar falla ubicado en la parte inferior derecha de la pantalla de alarmas. Al haber “limpiado” las fallas, el sistema se encuentra listo para un nuevo inicio en la secuencia de control.



Figura 4.16 pantalla de alarmas.

4.9 Estrategia de control utilizando PAC control.

Como se comentó en el apartado 4.2 esta es una herramienta basada en diagramas de flujo para desarrollar programas de control para correrlos en los controladores SNAP PAC. Estos diagramas fueron diseñados con los parámetros consignados en las estrategias de funcionamiento (apartado 2.8). En el anexo A, se muestran los diagramas de configuración de los parámetros de comunicación y tiempos de acceso en la primera parte; en la segunda se muestran los diagramas de acceso a la información que se utilizan en la actualización de las diferentes señales de entrada y salida del proceso y en la presentación de la información, finalmente se tienen los diagramas de operación que definen las secuencias para la puesta en marcha del SGEH. [34]

A continuación se realiza una lista de las cartas desarrolladas en este aplicativo, estas fueron realizadas en el trabajo de ingeniería “Diseño de un sistema automático de control para la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica”, **anexo 1**.

- Diagrama *powerup*: es el diagrama que se ejecuta en primera instancia cuando el programa se pone en modo RUN.
- Diagrama *Acceso IO*: en este diagrama se realiza la lectura y escritura de las diferentes variables análogas y digitales del sistema.
- Diagrama *ModBusSerial*: es el cual convierte el PAC en una estación maestra de Modbus, mientras que el medidor Lovato DMK22 es el esclavo.
- Diagrama *MewtocolSerial*: permite integrar los diagramas PowerUp y Mewtocol_Serial, y las subrutinas “*Mewtocol_inicio*” y “*Mewtocol_maestro*”.
- Diagrama de Manejo de Archivos: este diagrama utiliza el sistema de archivos del “*control engine*” para almacenar información, en un archivo de texto.
- Diagramas de operación: estos están relacionados con las secuencia de control de la planta para su operación de modo semiautomático, automático o manual. Para ello se tienen los siguientes diagramas:
 - Inicio secuencias.
 - Secuencias Arranque y Conexión.
 - Secuencia Operación y Secuencia Parada.

5. LAZOS DE CONTROL Y PRUEBAS DEL SISTEMA DE CONTROL (SGEH)

5.1 Introducción.

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo para realizar los lazos de control del sistema de generación hidroeléctrico de la Universidad del Valle. Inicialmente se implementa el control de velocidad para el grupo turbina generador, por medio del método de sintonía de Ziegler-Nicholsos, estos resultados son usados para realizar un estudio comparativo de tres formas diferentes de sintonía.

5.2 Lazos de control.

Un lazo de control es un arreglo de elementos orientados al mantenimiento de condiciones específicas en un proceso, maquinaria o sistema. En el sistema de control de SGEH, se desarrollan dos lazos de control bien identificados en las secuencias de funcionamiento de la planta, los cuales son:

1. Lazo de control para llevar el generador (motor asincrónico) a la velocidad de sincronismo (1800 rpm), para realizar la maniobra de acople a la red (en nuestro caso el generador entra como motor a la red).
2. Lazo de control para la potencia activa generada en régimen de trabajo de la planta.

5.2.1 Control de velocidad.

Teniendo en cuenta que el conjunto de generación esta conformado por una turbina (bomba reversible), un transmisión mecánica por poleas, y un generador asíncrono (motor asíncrono), como se observa en la figura 5.1. Se debe tener en cuenta que el motor, funciona a 220 V, a una frecuencia de 60 Hz y posee cuatro polos, que es lo que

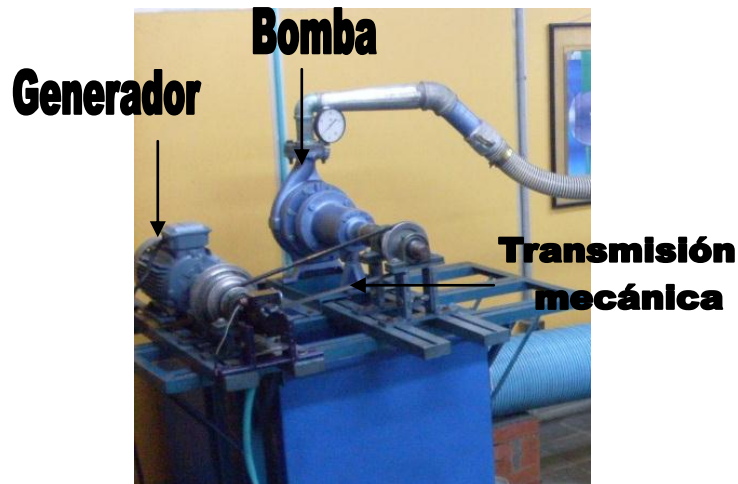


Figura 5.1 Equipos del grupo generador-turbina

permite determinar la velocidad de sincronismo del sistema. En la ecuación 5.1 se muestra el cálculo de la velocidad sincrónica para 4 polos.

$$n_s = \frac{120 * F}{P} = \frac{120 * 60}{4} = 1800rpm \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

ns: velocidad de sincronismo (rpm).
F: frecuencia del sistema (Hz).
P: numero de polos.

En la ecuación 5.1 se determina que la velocidad sincrónica para el sistema es de 1800 rpm, pero se debe recordar que los motores de inducción, presentan un deslizamiento el cual hace que no alcancen esta velocidad; como se dijo anteriormente el generador se conecta a la red como motor, lo cual permite que el generador tome los reactivos necesarios para funcionar.

Pasos para realizar el acoplamiento del sistema generador a la red:

- Encender el sistema motobomba.
- Aumentar progresivamente el caudal (cerrando la válvula motorizada) hasta que la velocidad en el generador sea aproximadamente 97 % de la velocidad sincrónica (1760 rpm), cuando nos encontramos en este rango de velocidad, el sistema se conecta a la red; con este procedimiento se consigue una reducción en el transitorio de corriente de arranque del generador.

- Después de estar conectado a la red se lleva el motor al régimen de trabajo de generador, esto se consigue aumentando la velocidad en el eje del generador por encima de la velocidad sincrónica a aproximadamente 1810 rpm.

Para poder realizar el controlador para la velocidad del generador es necesario contar con un modelo de la planta, el cual aparece en la ecuación 5.2 [34].

$$G(S) = \frac{-17.34}{S^2 + 1.609S + 0.5278} \exp(-0.0616S) \quad \text{Ecuación 5.2}$$

El controlador implementado para la velocidad en la planta es un proporcional e integral PI, el cual fue diseñado por medio de la herramienta SISOTOOL de MATLAB versión R2007a. Utilizando el algoritmo de sintonización Ziegler-Nichols open loop, para determinar la función de transferencia del compensador (ecuación 5.3).

$$C = -0.022106 \frac{1 + 2.6S}{S} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

La respuesta del sistema en el tiempo, como se observa en la figura 5.2. El máximo sobre paso (MP) es de 50.5%, el tiempo de subida (TR) de 1.49 segundos y un tiempo de estabilización (TSS) de 54.8 segundos.

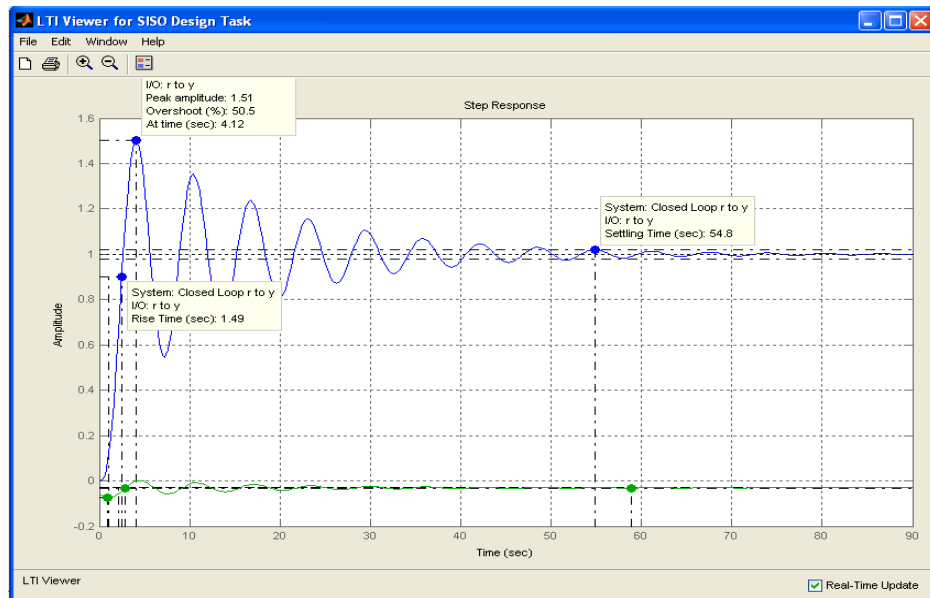


Figura 5.2 Respuesta transitoria del controlador PI inicial, algoritmo de sintonización Ziegler-Nichols open Loop [34]

- **Implementación del controlador PI.** La función de transferencia que caracteriza un controlador PI es:

$$G_c(S) = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

K_p es la ganancia proporcional

T_i es el tiempo de acción integral

Reescribiendo la ecuación anterior obtenemos:

$$G_c(S) = K * \left(\frac{1 + T_i S}{S} \right) \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Donde el valor de K se define como: $K = \frac{K_p}{T_i}$

Para el controlador obtenido tenemos entonces que $K = -0.022106$ y $T_i = 2.6$

Al discretizar la ecuación del controlador por medio de la transformada bilineal para un tiempo de muestreo T_s :

$$W = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Se obtiene:

$$G_c(Z) = \left(\frac{C_1 z + C_2}{z - 1} \right) \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde los valores de C_1 y C_2 se calcula como sigue:

$$C_1 = \frac{KT_s}{2} + KT_i$$

$$C_2 = \frac{KT_s}{2} - KT_i$$

Ahora reescribimos la ecuación del controlador utilizando potencias negativas de z para luego expresarla en forma de ecuación de diferencias:

$$G_c(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \left(\frac{C_1 + C_2 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$u(k) = u(k-1) + C_1 e(k) + C_2 e(k-1)$$

$u(k)$: Acción de control

$e(k)$: Señal de error

5.3 Estudio experimental de sintonía de controladores PI de velocidad.

La habilidad del controlador PI para compensar la mayoría de los procesos industriales prácticos ha llevado a su amplia aceptación en aplicaciones industriales. La implementación del controlador PI se recomienda para el control de procesos de orden bajo con pequeños tiempos de retraso, cuando el ajuste de los parámetros debe realizarse con reglas de sintonía y cuando la síntesis del controlador de ser realizada una o más veces. Se ha encontrado que el 30% de los controladores instalados están operando en modo manual y que el 65% de los lazos operando en automático producen menos varianza trabajando en manual que en automático, es decir los controladores no están adecuadamente sintonizados, a pesar de la cantidad de información disponible para determinar los parámetros del controlador automáticamente. [36]

Como se mencionó en la introducción del capítulo los resultados obtenidos en el método de sintonía, utilizando el algoritmo de sintonización Ziegler-Nichols open loop (lazo abierto), son utilizados como punto de partida para poder realizar las comparaciones con la sintonización con el método Ziegler-Nichols closed loop (lazo cerrado), el algoritmo de sintonización Singular frequency based tuning (algoritmo de sintonización de frecuencia basados en sintonía singular) y por último el algoritmo de sintonización internal model control (IMC) based tuning.

Para realizar el análisis comparativo de los desempeños alcanzados por la acción de control mediante la aplicación de las técnicas de sintonía bajo estudio, se definen los siguientes índices de desempeño:

MP: Máximo pico, sobre impulso. Diferencia entre el máximo valor alcanzado por la variable, de proceso, **PV**, y el valor deseado o consigna **SP**.

Tr: Tiempo de subida. Tiempo en el cual la variable de proceso, **PV**, alcanza por primera vez el valor de consigna.

Ess: error de estado estacionario. Diferencia entre el valor de consigna, **SP**, y la variable de proceso, **PV**, cuando esta alcanza su valor de estado estacionario.

Tss: Tiempo de establecimiento. Tiempo en el cual la variable de proceso alcanza su valor final o de estado estacionario.

5.3.1 Método de sintonía de ziegler nichols open loop.

Los parámetros obtenidos en la aplicación del método se muestran en la tabla 5.1, estos datos se calculan en el numeral 5.2.1 y se obtienen de la ecuación 5.3.

Tabla 5.1 Parámetros de sintonización controlador PI, ziegler nichols open loop.

Kc	-0,022106
Ti	2,6

Donde: Kc es la ganancia proporcional del controlador.

Ti es el tiempo integral en segundos.

Como se pudo determinar en la figura 5.2, los índices establecidos, se depositan en la tabla 5.2 que muestra los desempeños del controlador.

Tabla 5.2 Desempeños del controlador PI, ziegler nichols open loop.

Desempeño del controlador PI sintonía de ziegler nichols open loop			
MP	Tr	Ess	Tss
50.5 %	1,49 seg	0	54,8 seg

5.3.2 Método de sintonía de ziegler nichols closed loop.

Para sintonizar el controlador PI por medio de este método, se emplea el modelo de la planta que aparece en la ecuación 5.2 (igual como será empleado por los otros métodos), se procede a realizar la sintonización y se obtiene la ecuación de la función de transferencia del compensador (ecuación 5.9).

$$C = -0.010752 \frac{1+4.1S}{S} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

De la ecuación 5.9 determinamos los parámetros obtenidos después de ajustar los valores del controlados PI, estos valores a parecen en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Parámetros de sintonización controlador PI, ziegler nichols closed loop.

Método de sintonía de ziegler nichols open loop	
Kc	-0,010752
Ti	4,1

Al aplicar los parámetros de sintonización obtenidos por el método de ziegler nichols closed loop, se obtiene la respuesta en el tiempo de la variable de proceso y de la señal de control, las cuales se muestran en la figura 5.3.

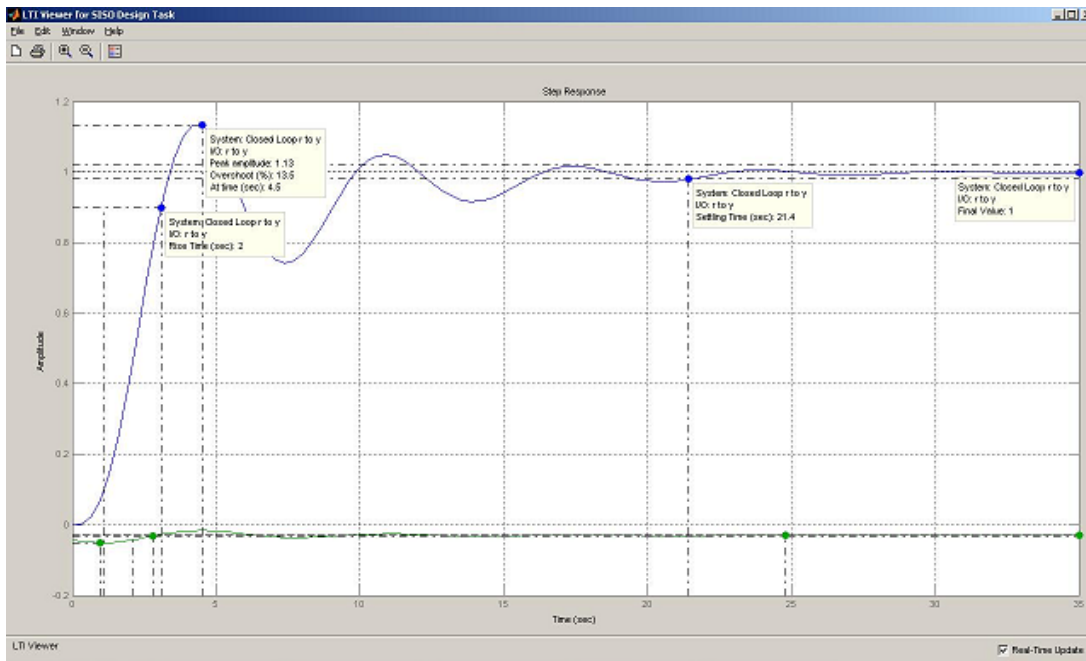


Figura 5.3 Respuesta del controlador PI. Método de ziegler nichols closed loop.

En la figura 5.3 se puede observar que el $MP = 13.5\%$, que la variable de proceso alcanzó el valor de la señal de consigna en $Tr = 2$ segundos, que el tiempo de establecimiento fue de $Tss = 21.4$ segundos. En la tabla 5.4 se muestran los índices de desempeño del controlador PI.

Tabla 5.4 Desempeños del controlador PI, ziegler nichols closed loop.

Desempeño del controlador PI sintonía de ziegler nichols open loop			
MP	Tr	Ess	Tss
13.5 %	2 seg	0	21.4 seg

5.3.3 Método de sintonía singular frequency based tuning.

Para establecer la sintonización del controlador PI, se implementa la función de transferencia de planta, descrita en la ecuación 5.2, se procede a realizar la sintonización por éste método y se obtienen la ecuación de transferencia del compensador (ecuación 5.10).

$$C = -0.016486 \frac{1 + 2.5S}{S} \quad \text{Ecuación 5.10}$$

De la ecuación 5.10 se extraen los parámetros de sintonización, los cuales se encuentran registrados en la tabla 5.5

Tabla 5.5 Parámetros de sintonización controlador PI, singular frequency based tuning.

Método de sintonía de ziegler nichols open loop	
Kc	-0,016486
Ti	2.5

Al aplicar los parámetros de sintonización obtenidos por el método de singular frequency based tuning, se obtiene la respuesta en el tiempo de la variable de proceso y de la señal de control, las cuales se muestran en la figura 5.4.

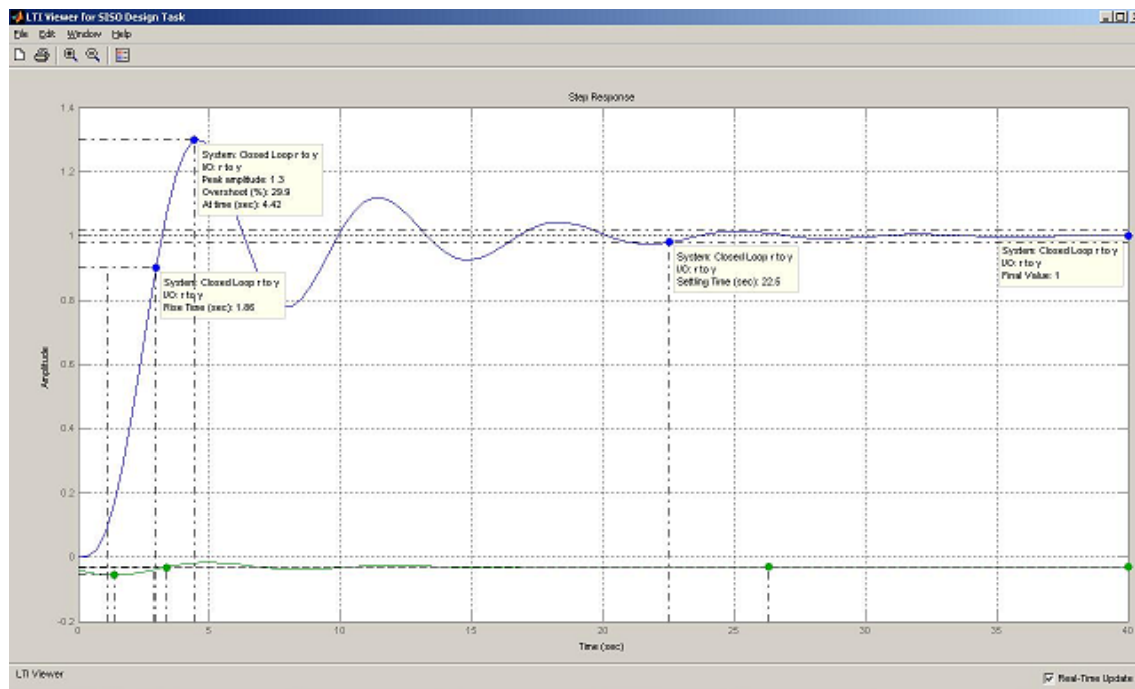


Figura 5.4 Respuesta del controlador PI. Método de singular frequency based tuning.

En la figura 5.4 se puede observar que el MP= 29.9 %, que la variable de proceso alcanzó el valor de la señal de consigna en Tr= 1.86 segundos, que el tiempo de establecimiento

fue de Tss= 22.5 segundos. En la tabla 5.6 se muestra los índices de desempeño del controlador PI.

Tabla 5.6 *Desempeños del controlador PI, singular frequency based tuning.*

Desempeño del controlador PI sintonía de ziegler nichols open loop			
MP	Tr	Ess	Tss
29.9 %	1.86 seg	0	22.5 seg

5.3.4 Método de sintonía Internal model control (IMC) based tuning.

Se procede a establecer la sintonización del controlador PI, se utiliza la función de transferencia de planta, descrita en la ecuación 5.2, y se procede a realizar la sintonización por éste método y se obtienen la ecuación de transferencia del compensador (ecuación 5.11).

$$C = -0.009879 \frac{1 + 2.1S}{S} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

De la ecuación 5.11 se extraen los parámetros de sintonización, los cuales se encuentran registrados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 *Parámetros de sintonización controlador PI, Internal model control (IMC) based tuning.*

Método de sintonía de ziegler nichols open loop	
Kc	-0,009879
Ti	2.1

Al aplicar los parámetros de sintonización obtenidos por el método de sintonía Internal model control (IMC) based tuning y teniendo en cuenta que el valor de dominant closed loop time constant, es igual a 1.007, se obtiene la respuesta en el tiempo de la variable de proceso y de la señal de control, las cuales se muestran en la figura 5.5.

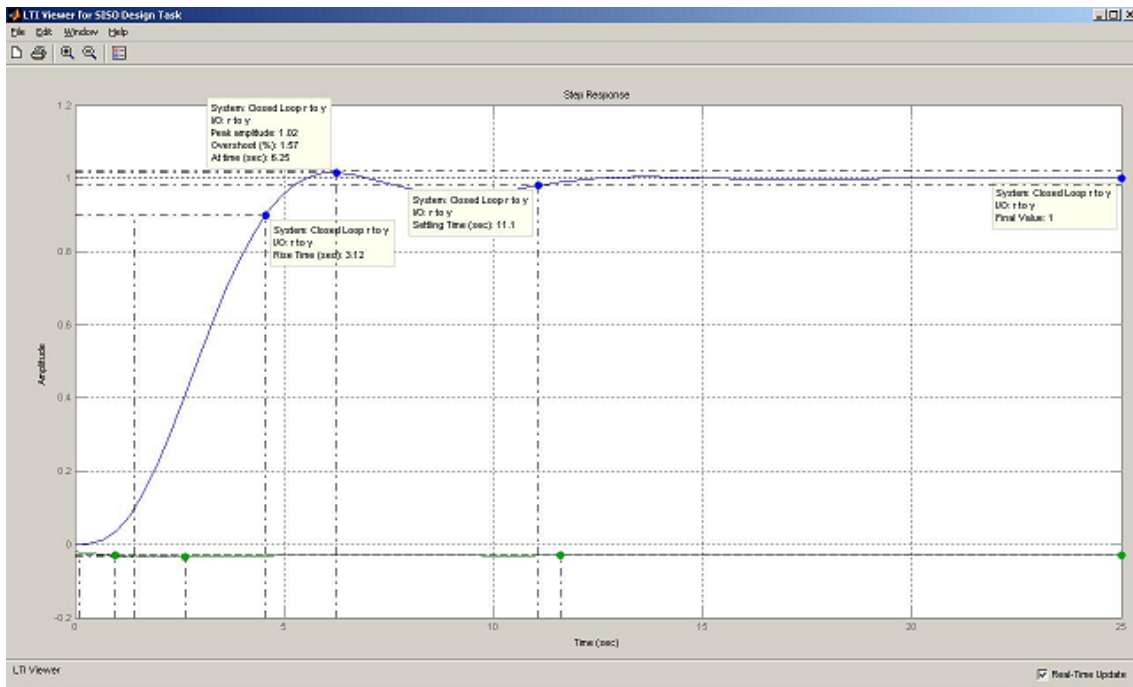


Figura 5.5 Respuesta del controlador PI. Método de sintonía Internal model control (IMC) based tuning.

En la figura 5.5 se puede observar que el MP= 1.57 %, que la variable de proceso alcanzo el valor de la señal de consigna en Tr= 3.12 segundos, que el tiempo de establecimiento fue de Tss= 11.1 segundos. En la tabla 5.8 se muestra los índices de desempeño del controlador PI.

Tabla 5.8 Desempeños del controlador PI, sintonía Internal model control (IMC) based tuning.

Desempeño del controlador PI sintonía de ziegler nichols open loop			
MP	Tr	Ess	Tss
1.57 %	3.12 seg	0	11.1 seg

Como se puede observar en la figura 5.6 se muestra el índice de desempeño para las cuatro técnicas implementadas, Ziegler Nichols closed loop, Ziegler Nichols open loop, singular frequency based tunin y Internal model control (IMC) based tuning.

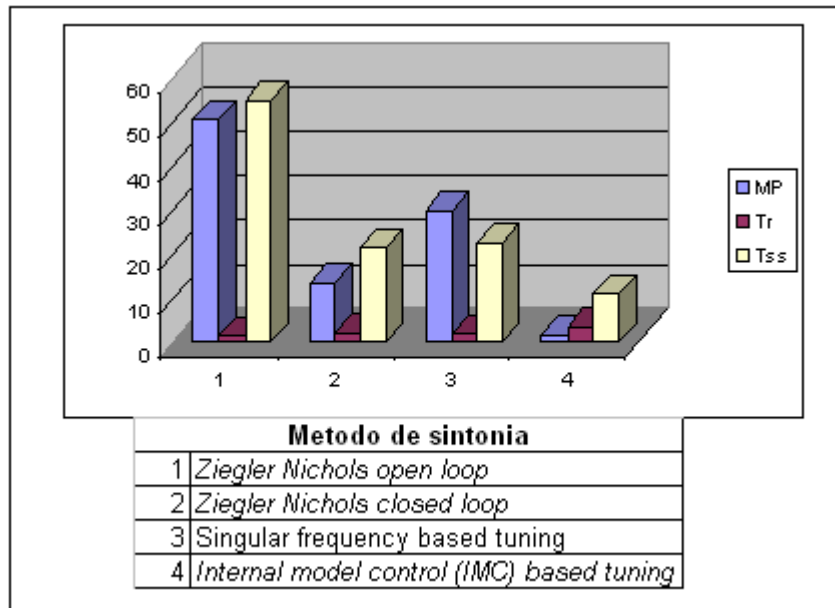


Figura 5.6 Índice de desempeño para las cuatro técnicas implementadas.

En los métodos de sintonía Ziegler Nichols open loop y singular frequency based tuning el sobre paso resulta muy elevado (50.5 % y 29.9 % correspondientemente) por lo que para la implementación del controlador PI, estos se consideran descartados. Aunque el método de sintonía Ziegler Nichols closed loop presenta un sobre paso de 13.5 %, el método Internal model control (IMC) based tuning es el que presenta el mejor desempeño para la implementación del controlador.

Aunque el sobre paso en el método Internal model control (IMC) based tuning es del 13.5 %, se hace necesario realizar un ajuste sobre el diseño. Los ajustes se realizan de forma gráfica, modificando el valor en el compensador con el fin de mejorar la respuesta transitoria y así disminuir el sobrepaso. Como se puede observar en la figura 5.7.

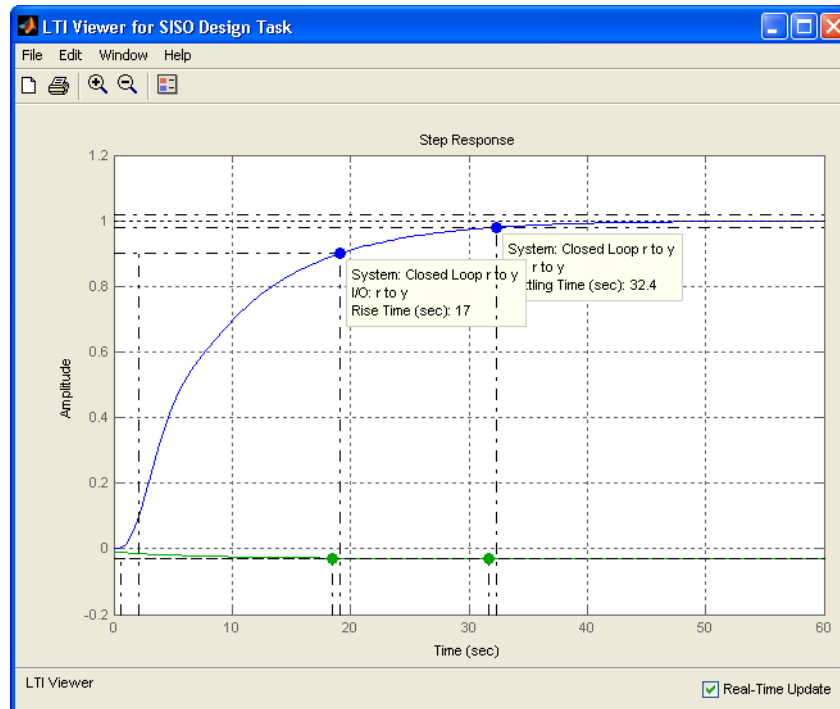


Figura 5.7 Respuesta transitoria del controlador PI con ajuste en la ganancia

Con el ajuste de la ganancia del controlador se obtiene una respuesta que no presenta sobrepaso. Donde que la variable de proceso alcanzo el valor de la señal de consigna en $T_r = 32.4$ segundos, que el tiempo de establecimiento fue de $T_{ss} = 17$ segundos, con lo que se obtiene la ecuación 5.12 para la implementación del controlador.

$$C = -0.0035x \frac{1 + 2.5S}{S} \quad \text{Ecuación 5.12}$$

De la ecuación 5.12 se extraen los parámetros de sintonización, los cuales se encuentran en la tabla 5.9, con los cuales se implementa el controlador PI, en la estrategia de control.

Tabla 5.9 Parámetros de sintonización controlador PI.

Parámetros del control PI	
KC	- 0.0035
Ti	2.5

5.4 Control para la potencia activa generada en régimen de trabajo de la planta.

El lazo de control para la potencia se implementa con las señales generadas por el ángulo de apertura de la válvula y por la señal de potencia activa del medidor Lovato DMK 22 que es el elemento que cumple la función de realimentación. En la tabla 5.9 se muestran las variables con su respectiva función.

Tabla 5.10 Variables y señales que intervienen en el control de la potencia activa.

Señal	Función
Apertura de válvula	Señal de control
Flujo de agua	Variable manipulada
Potencia activa	Variable controlada

De acuerdo a las secuencias de funcionamiento del sistema expuesto en el capítulo 2, el control de velocidad opera mientras el sistema alcanza la velocidad de sincronización con la red y luego lo hace el control de potencia activa y en ninguno de los casos en forma simultáneamente. Se debe recordar que para el control de potencia no se hace control de la velocidad, voltaje y frecuencia del generador, ya que estos son impuestos y mantenidos por la red, en cuanto a la velocidad, esta no sobrepasa las 1820 rpm, por lo tanto al aumentar el caudal que llega a la turbina, lo que se logra con esto es aumentar la potencia generada.

Procedimiento para toma de valores para la construcción del controlador.

1. Desde la interfaz de operación, se procede a realizar las secuencias de funcionamiento, de la planta hasta la conexión con la red.
2. Con el sistema ya conectado se realizó una prueba en lazo abierto donde se toman los valores de la apertura de la válvula, con relación a la potencia activa generada, llevando la válvula desde 70 % hasta el 0 %, con el fin de observar el comportamiento del sistema. En la figura 5.7 se muestra el comportamiento de la apertura de la válvula Vs la potencia generada.

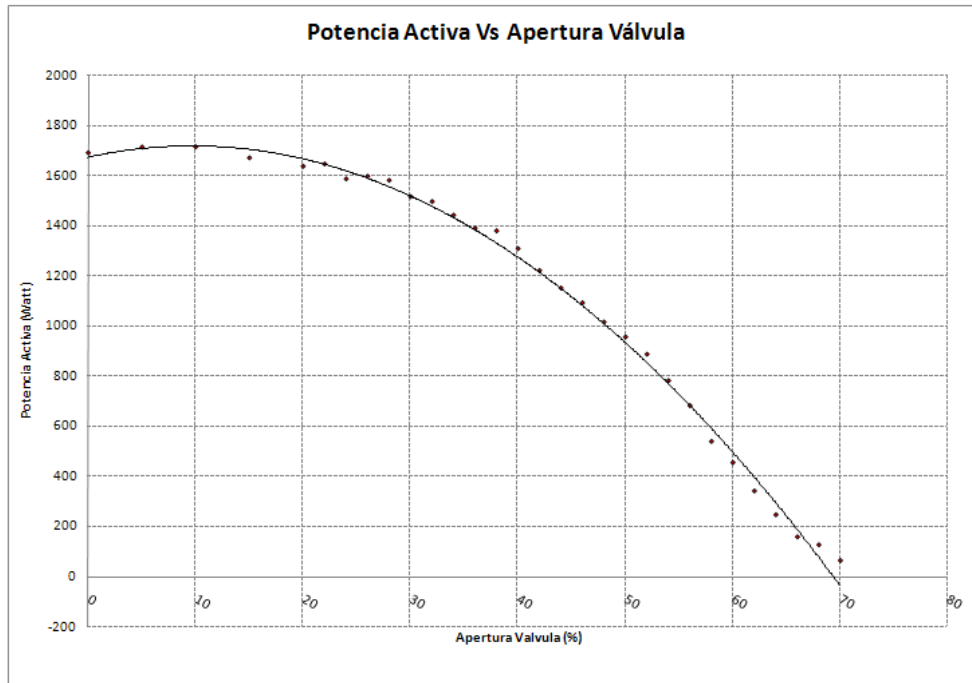


Figura 5.8 Comportamiento de la apertura de la válvula Vs la potencia generada.

Como se puede observar en la figura 5.7, no es una relación lineal, las técnicas de control utilizada para implementar el controlador se hace por alternativas de control moderno. En primer caso se utiliza un controlador Fuzzy [34], el cual se encuentra completamente desarrollado en el **anexo 2**.

5.5 Operación del sistema SGEH.

Las pruebas realizadas con la interfaz HMI de operación del sistema, permiten verificar el buen funcionamiento de los diferentes elementos que conforman la planta. La información que se genera por cada sensor para el inicio de la operación de la planta (pre-chequeo), y las instrucciones iniciales se verifican de forma adecuada y correcta, permitiendo avanzar en las secuencias; se hace una verificación del controlador PI, para el control de la velocidad del generador y su posterior conexión a la red. En la interfaz se puede observar lo siguiente:

- El tiempo que se toma para verificar las condiciones iniciales y el tiempo que le toma al grupo motobomba para eliminar el aire y empezar su proceso de bombeo.

- El tiempo que tarda el controlador de velocidad en llevar al generador a una velocidad de 1760 rpm entre 50 y 75 segundos, para poder ser conectado el sistema a la red.
- En las pantallas de secuencias, alarmas y tendencias, se pueden verificar todos los datos de las variables más importantes.
- Cada una de las pantallas trabajan de forma adecuada y armoniosa entre ellas.
- Se hace una verificación de las formas de arranque (manual, semiautomático y automático) de la estrategia de control para el sistema, determinando el buen funcionamiento de cada una de ellas.

5.6 Pruebas y resultados.

5.6.1 Pruebas al controlador PI de velocidad.

Para evaluar el comportamiento de la velocidad del motor, se realizó una prueba donde se llevó el sistema hasta la etapa de regulación de velocidad en la estrategia de control y se aplicaron cambios en la referencia de velocidad.

En la figura 5.9 se muestra la respuesta de la velocidad del motor utilizando el controlador PI aplicando un cambio en la referencia de 1500 rpm a 1800 rpm, donde se puede observar que se alcanza una respuesta satisfactoria de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación del controlador.

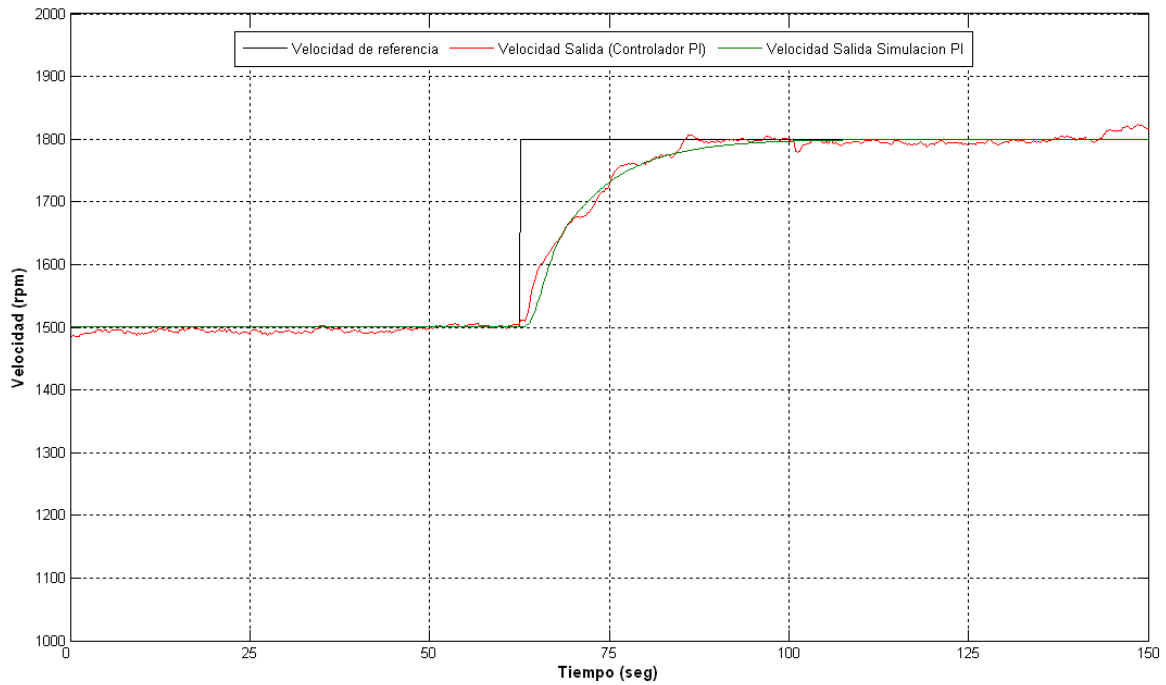


Figura 5.9 Respuesta de la velocidad del motor con el controlador PI real y simulado.

En la figura 5.10 se puede observar como el sistema muestra una recuperación al aplicar una entrada de disturbio la cual consistió en provocar un aumento repentino en el flujo inyectado a la turbina.

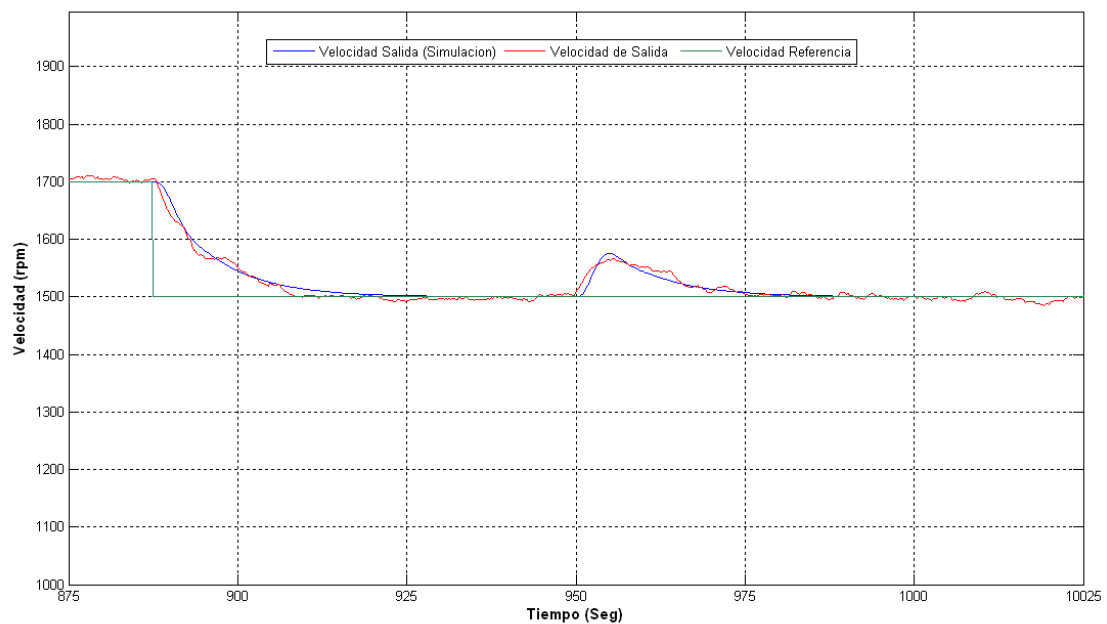


Figura 5.10. Respuesta ante un disturbio en la entrada del sistema.

5.6.2 pruebas al controlador de potencia activa.

Para la prueba del control de potencia activa, fijamos en la pantalla principal una potencia de trabajo, en la prueba de 1000 W y luego iniciamos el sistema SGEH en el modo de operación automático. Aplicando cambios en el valor de la referencia se obtiene la respuesta mostrada en la figura 5.11.

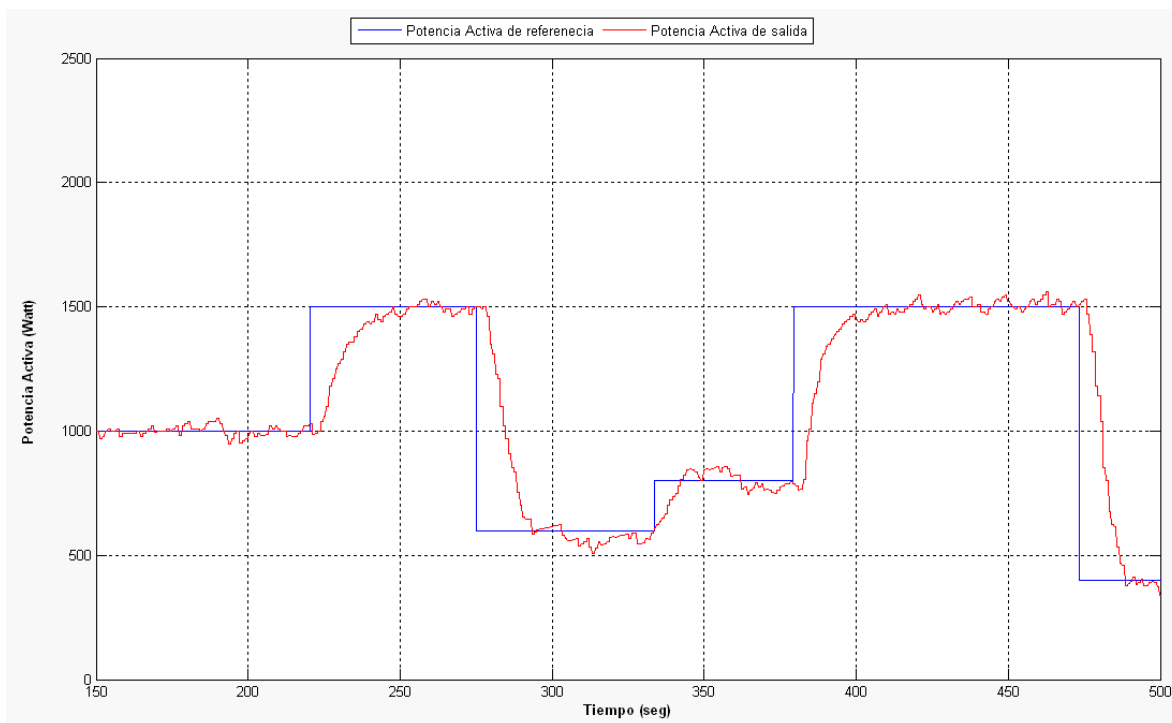


Figura 5.11. Respuesta de la potencia de salida utilizando controlador Fuzzy

En la figura 5.12 se muestra la respuesta del sistema ante un cambio en la referencia de 0.8 KW hasta 1.5KW presentando un tiempo de estabilización de 25 segundos utilizando el criterio del 2%. Se puede observar fluctuaciones en la señal de salida las cuales varían dentro del rango del 2% del valor final deseado.

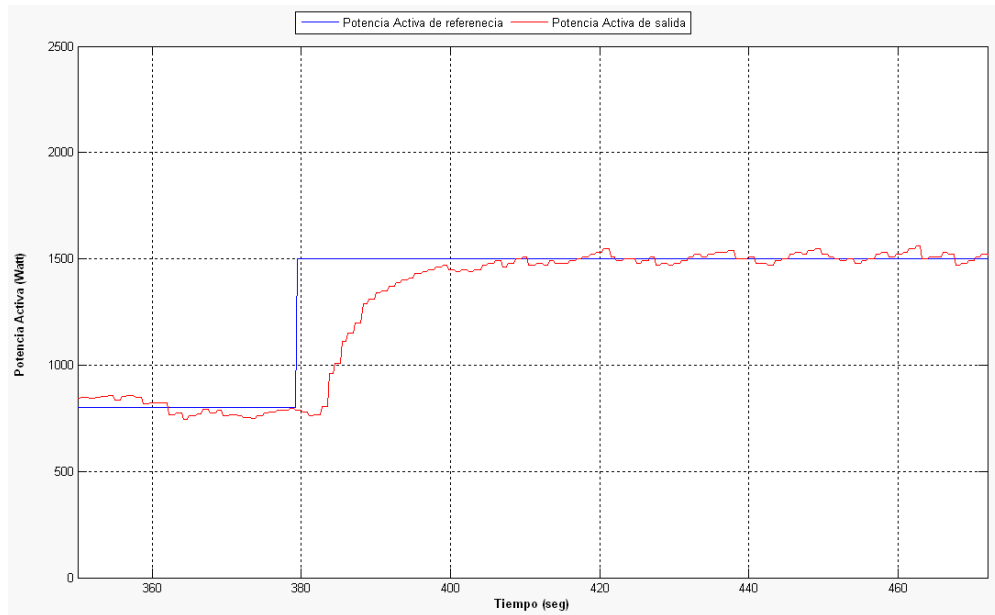


Figura 5.12. Respuesta al escalón de potencia de salida utilizando control fuzzy.

5.6.3 Prueba Comunicación entre el PAC y la Base de datos para la comunicación web. [37]

El trabajo se centró ahora en poder traer los datos del controlador a la base de datos y de ésta al controlador. Este proceso tuvo varios inconvenientes relacionados con la aplicación Web, debido a que este protocolo sirve para algunos controladores que no traían servidor Web y eran costosos. En este punto se toma por el grupo la determinación de escoger el controlador PAC Opto 22 y todo el software asociado, dentro de los cuales viene incluido uno que soluciona la comunicación del controlador y la base de datos en el servidor; este software se llama OptoDataLink.

Para lograr esto, se crean enlaces en el OptoDataLink que funcionan en un solo sentido, a saber, de una tabla de la base de datos al PAC o del PAC a otra tabla diferente a la primera en la base de datos pero no en ambos sentidos en un mismo enlace, figura 5.12.

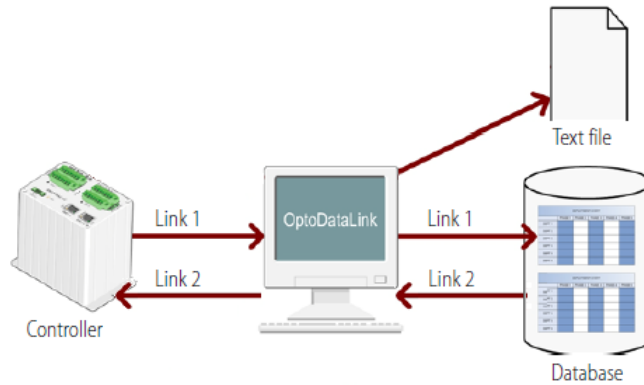


Figura 5.12. Comunicación entre PAC y base de datos [37].

Para lograr el intercambio de datos, en el enlace creado se debe referenciar la fuente de los datos y el destino de los mismos. Para el caso en el que el PAC es la fuente de datos, se relacionan variables numéricas de la estrategia de control con campos de una tabla en la base de datos. Para el caso en el que la fuente es la base de datos, se relaciona uno a uno todos y cada uno de los elementos de la tabla de la base de datos con las variables numéricas en la estrategia del PAC.

Este software fue importante para alcanzar el objetivo de poder comunicar la aplicación Web con el controlador PAC Opto 22 en los dos sentidos.

6. CONCLUSIONES

La evaluación del estado del arte alrededor de laboratorios de Pequeñas centrales hidroeléctricas, ha mostrado los grandes esfuerzos que se vienen desarrollando por algunos países latinoamericanos para incursionar en la investigación en esta materia.

El esfuerzo realizado por la universidad del Valle, para la implementación de este laboratorio, hace posible el conocimiento real del funcionamiento de una central hidroeléctrica, permitiendo la capacitación de personal para el manejo y la investigación en máquinas hidráulicas.

Al seleccionar la instrumentación para cada una de las variables, se tuvo en cuenta la ubicación de cada uno, los posibles disturbios a los que puedan estar expuestos y las posibilidades a interferencia, todo esto para poder garantizar la medición.

Los datos de campo son adquiridos por los dispositivos electrónicos, aunque estos dispositivos deben presentar un sistema redundante en una central real, en este proyecto por los costos no se cumple con esta condición, en cuanto a la interfaz y protocolos de comunicación si son estandarizados; además, se comprueba que la adquisición de datos es en tiempo real.

Con la instrumentación implementada se permite al estudiante o investigador un laboratorio con mejor gestión de la operación, que brinda información amplia de los sucesos del sistema.

Las ventajas de comunicación, utilizando estándares abiertos basados en IP proporcionados por el SNAP PAC System frente a otros equipos encontrados en el mercado ayudan a la integración del sistema a los recursos WEB de la Universidad del Valle facilitando su operación remota a través de Internet.

Con este trabajo se logra diseñar e implementar un laboratorio SGEH, completamente automatizado, el cual a través de la interfaz HMI, desarrollada permite la gestión de las

secuencias de funcionamiento estandarizadas en la norma IEEE 1010. El HMI proporciona información confiable y a tiempo tanto desde el proceso hacia el operador, como viceversa.

El hecho de que el laboratorio presenta una característica de ser modular, garantiza la utilización de diferentes turbinas hidráulicas y generadores, lo que permite un gran margen para la investigación es la construcción o prueba de estos grupos.

Como el grupo de bombeo (motobomba), cuenta con un regulador de frecuencia, esto permite la investigación en máquinas rotativas (motores).

En este trabajo se hace la implementación de diferentes formas de sintonía del controlador de velocidad PI, permitiendo que en la interfaz se pueda hacer una verificación de los parámetros obtenidos en las simulaciones en MATLAB. Para esta implementación se tuvo en cuenta en garantizar las mismas condiciones, para tener unos buenos parámetros de referencia. Los índices de desempeño definidos fueron MP máximo sobre impulso, Tr tiempo de subida, Tss tiempo de establecimiento, Ess error de estado estacionario. Lo que permite determinar que el método Internal model control (IMC) based tuning, fue el más cercano y punto de partida para las constantes del controlador.

Dada la necesidad de comunicar los datos del sistema de generación de energía, se implementó un sistema informático, a partir del software del mismo fabricante del PAC Opto 22 llamado Datalink, este software permite tomar los datos del controlador y de la aplicación Web para ponerlos en la base de datos. Una vez la información está en la base de datos se cierra todo el sistema de comunicación para lograr los objetivos de la interfaz remota. Para conseguir la comunicación entre el Datalink y la base de datos fue necesario usar el ODBC.

Como uno de los productos de este proyecto en el anexo 3 (pág. 114) se encuentran las pruebas de laboratorio, que permitirán la capacitación y formación en sistemas de generación.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Hangzhou Regional Center for small hidro power (HRC), disponible en línea.
<http://www.hrcshp.org/en/exchange/2.html>
- [2] Sánchez Teodoro, Ram Sal, Turbina axial: Bajas caidas, bajo mantenimiento, bajo costo, Revista Hidrored, ISSN 0935 - 0578 volumen 1 2003.
- [3] Oferta y demanda del recurso hidrico en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). Colombia.
<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/VIJornadas/A13.pdf>
- [4] Wagner, B. Computer-Based Teaching to Virtual Laboratories in Automatic Control , Institute of Control Engineering and Didactics of Electrical Engineering, University of Hanover, Lange Laube 32.
- [5] Huan-Wen Tzeng; Chin-Ming Tien, Design of a virtual laboratory for teaching electric machinery.
- [6] ARROYO SANCHEZ, Jose Manuel. Centrales Hidroelectricas, Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Superior de Informática de Ciudad Real, Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información, disponible en línea.
<http://www.uclm.es/area/gsee/aie/censublin/hidraulicas.pdf>
- [7] DELGADO BERMEJO, Victor. Guía para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. 2007
- [8] AGUERA SORIANO, Jose, Mecánica de fluidos incompresibles y turbo máquinas hidráulicas.
- [9] Centrales hidroeléctricas, Jenijos.com. Disponible en línea:
http://www.jenijos.com/CENTRALESHIDROELECTRICAS/centrales_hidroelectricas.htm
- [10] O&M Eléctrica Matamoros, imágenes de maquinas. Disponible en línea:
<http://www.electricamatamoros.com/Imagenes/Mediana/PlatanarF3.jpg>
- [11] Ortiz R. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Mc-GRAW-HILL INTERAMERICANA.
- [12] INSTITUTO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS Y ELECTRÓNICOS: IEEE. Guide for Control of Small Hydroelectric Power Plants, STD 1020. New York: IEEE. 1988.
- [13] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. Guía para el Control de las Plantas de Energía Hidroeléctrica. IEEE 1010, 1987.
- [14] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. Standard for interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE 1547.

- [15] Adamiak M, Baigent D, Mackiewicz R, Communication Network and Systems in Substations, GE Digital Energy, IEC 61850
- [16] international standard, Application integration at electric utilities – System interfaces for distribution management –Part 1: Interface architecture and general requirements, IEC 61968-1, 2003.
- [17] Víctor M. Alfaro Ruiz. Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler- Nichols. Ingeniería 15, 39-52, ISSN 1409-2441,2005.
- [18] Corripio A. Tuning of Industrial Control Systems. ISA- The instrumentation, Systems, and Automation Society, 2nd Edition.
- [19] Meier, F. y Meier, C. “Instrumentation and Control Systems Documentation”. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2004.
- [20] L. Trevathan, V. “A Guide to the Automation Body of Knowledge”. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006.
- [21] “Control Philosophy and Standards for UCOS Project Design and development”. Control Systems International Inc. 1999
- [22] ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. Disponible en: <http://www.isa.org>
- [23] Diseño y construcción de una Micro Central Hidroeléctrica de 5 kilovatios de Caudal y Caída Variables.
- [24] Opto 22, 2008, SNAP PAC R-Series Controllers, Ficha técnica. Disponible en: <http://www.opto22.com>
- [25] TAPIA FLÓREZ F, GONZÁLEZ HUERGO F, Análisis y especificación de la instrumentación para implementar la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica
- [26] User's Guide: Installation and operation instructions Doppler Flow Meter. [En línea] Estados Unidos: GREYLINE Instruments Inc. Manual Series A.2. Disponible en: <http://www.greyline.com/pdf/DFM%205.0%20Manual%20Series%20A8.1.pdf>
- [27] Smar International, 2005, SMART PRESSURE TRANSMITTERS LD291, Ficha técnica. <http://www.smart.com>
- [28] Radio-Energie Tachogenerators/ RE.0.444R-Brochure. [En línea]. Francia: Radio Energie, 2009. Disponible en: <http://www.transdrive.co.uk/tachogenerators/radio-energie/re0444r.asp>

- [29] LOVATO ELECTRICS S.P.A., INSTRUMENTOS DIGITALES DE MEDIDA Y TRANSFORMADORES DE CORRIENTE, ficha técnica, 10 pag. Disponible en:
www.lovatoelectronics.com
- [30] A-T Controls, Inc., Modulating Electric Actuator TRIAC - EMI-300, ficha técnica
- [31] LD291 Manual de instrucciones, operación y mantenimiento [En línea]. Brasil: SMAR, 2005. Disponible en:
<http://www.smar.com/>
- [32]. Escudero Fombuena, Jose Ignacio; L. Joaquín. "Telecontrol de redes eléctricas". Universidad de Sevilla, Departamento de ingeniería electrónica, Sevilla, 1994
- [33] PAC DISPLAY USER'S GUIDE [En línea]. Estados Unidos: OPTO 22, 2008. Disponible en:
<http://www.opto22.com/>
- [34] Correa Valencia, Félix Andrés, García Ibarra, Alejandro Rafael, diseño de un sistema automático de control para la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica. 2010.
- [35] IEEE Tutorial course. Fundamental of supervisory system, 91 EH0337-6 PWR, New Cork, 1991.
- [36] [Dwyer instrumentación industrial. Disponible en:
www.dwyer-inst.com 2000.
- [37] Giraldo, Edgar A, Diseño e implementación de una interfaz gráfica para la operación remota de un sistema de generación hidroeléctrico. 2011.

ANEXOS

A1. Diagramas de configuración.

Toda estrategia de control creada con el PAC Control contiene un diagrama llamado *powerup* y es el diagrama que se ejecuta en primera instancia cuando el programa se pone en modo RUN

Parámetros de inicialización para la comunicación con el medidor Lovato DMK22.

- Dirección de esclavo Modbus del DMK22: 08
- Modo de Comunicación MODBUS: 0 = RTU, 1 = ASCII: 0
- Tiempo de espera en segundos antes de generar error por no recepción de datos MODBUS: 0.5
- Interpretación de los datos MODBUS: 0=16UI, 1=16SI, 2=32F, 3=32FSWP, 4=32SI, 5=32SISWP: 0
- Tiempo en milisegundos entre toma de datos: 100
- Dirección TCP y puerto del Modulo Serial RS485 ubicado en el Rack:
tcp:127.0.0.1:22506

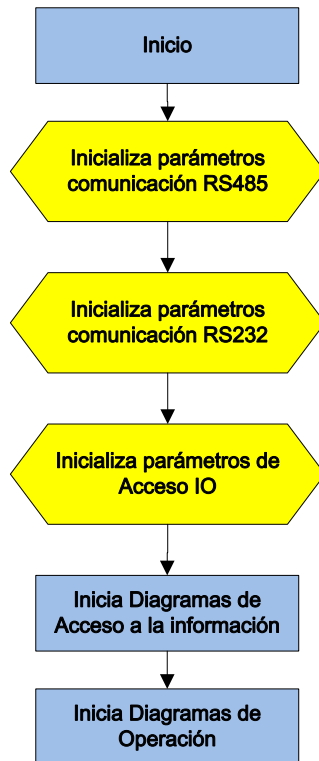


Diagrama powerup

Diagramas de acceso a la información. La adquisición y presentación de la información se realiza a través de los diagramas *AccesoIO*, *Manejo De archivos*, *MewtocolSerial*, *ModbusSerial*.

Diagrama AccesoIO. En este diagrama se realiza la lectura y escritura de las diferentes variables análogas y digitales del sistema (ver figura A2). Se realizan entonces las siguientes acciones:

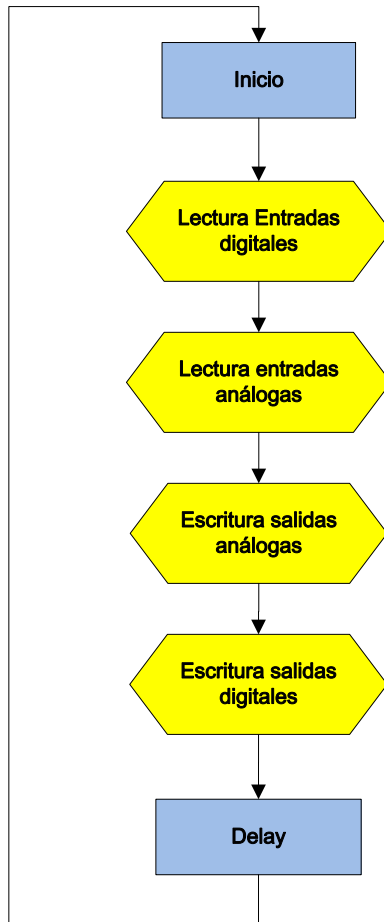


Figura A2 Diagrama AccesoIO

Diagrama ModBusSerial. La lectura de las variables eléctricas se realiza por medio del medidor Lovato DMK22 el cual las envía al PAC a través de un enlace serial RS485 utilizando el protocolo de comunicación MODBUS y es por esto que se cuenta con el diagrama mostrado en la figura A3 llamado **ModbusSerial** el cual convierte el PAC en una estación maestra de Modbus, mientras que el medidor Lovato DMK22 es el esclavo.

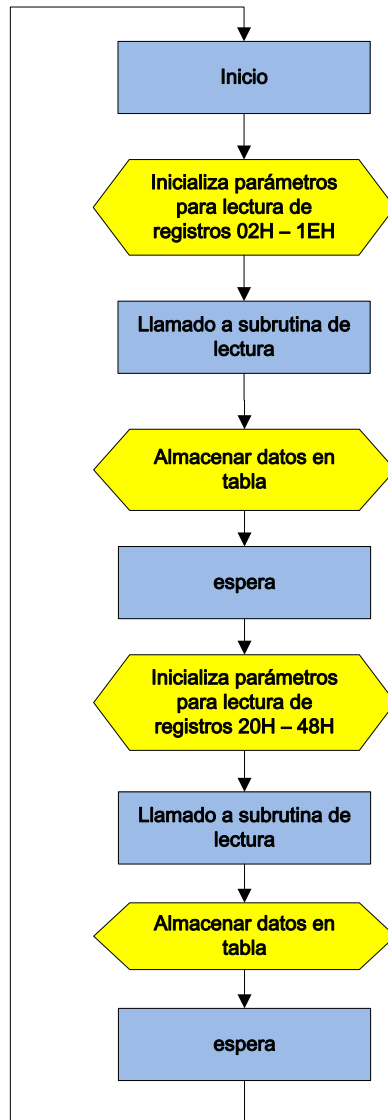


Figura A3. Diagrama ModbusSerial. Lectura de medidas eléctricas utilizando el protocolo Modbus

Diagrama MewtocolSerial: Para la apertura, establecimiento y cierre de la comunicación serial RS232, así como para el envío y la recepción de datos entre la pantalla táctil Panasonic y el controlador SNAP PAC se utilizan los diagramas de PowerUp y Mewtocol_Serial, además de las subrutinas “Mewtocol_inicio” y “Mewtocol_maestro”, estos diagramas y subrutinas pertenecientes a la estrategia de control se ejecutan teniendo en cuenta la estructura del protocolo Mewtocol.

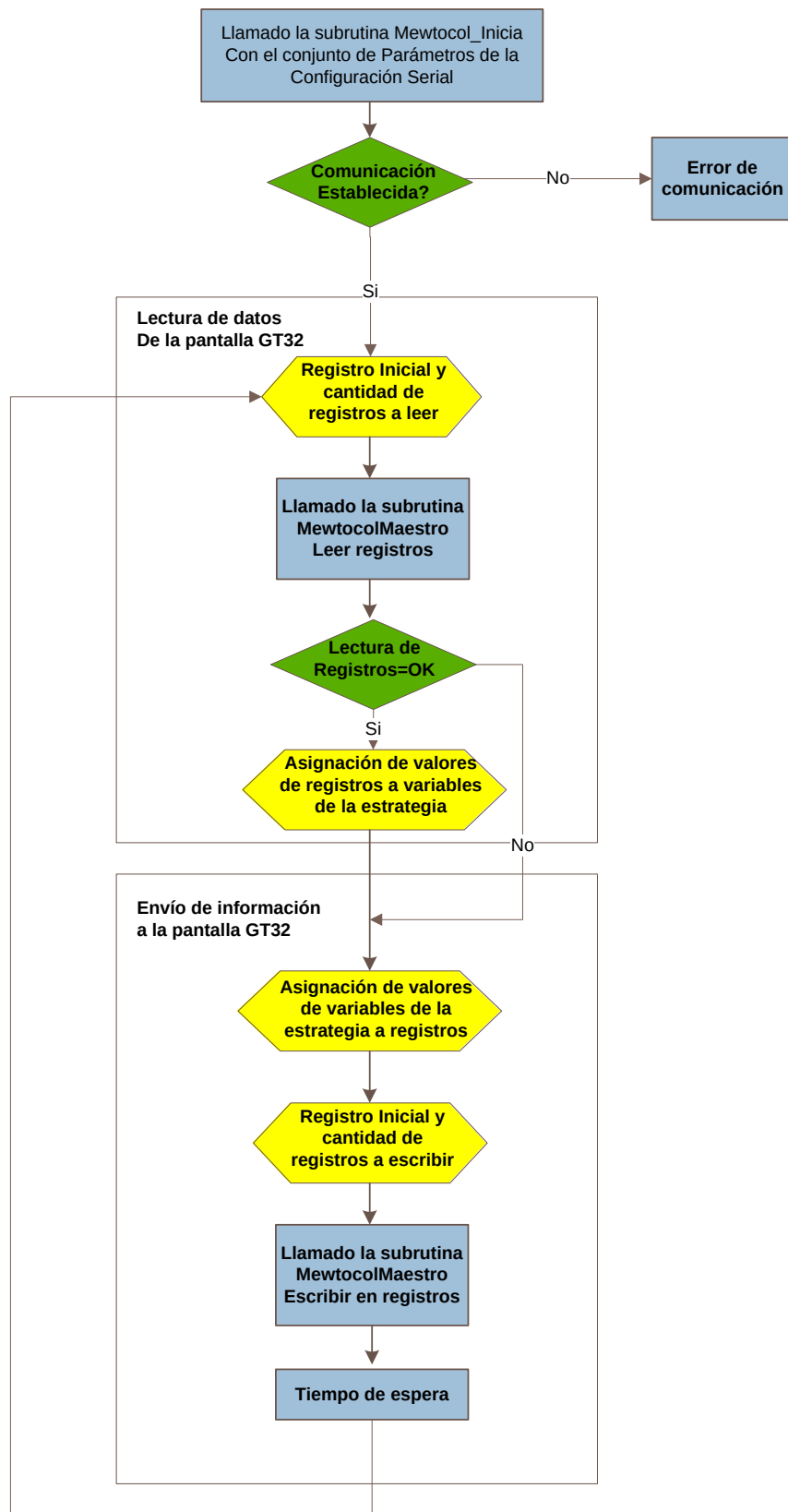


Figura A4. Diagrama MewtocolSerial

Diagrama de Manejo de Archivos. La información registrada durante el proceso puede ser almacenada en un archivo de texto y para ello se cuenta con el diagrama de la figura A5 llamado **ManejoDeArchivos**, este diagrama utiliza el sistema de archivos del “control engine” donde se cuenta con cerca de 2 MB de memoria disponible para el almacenamiento de archivos en los controladores SNAP PAC serie R.

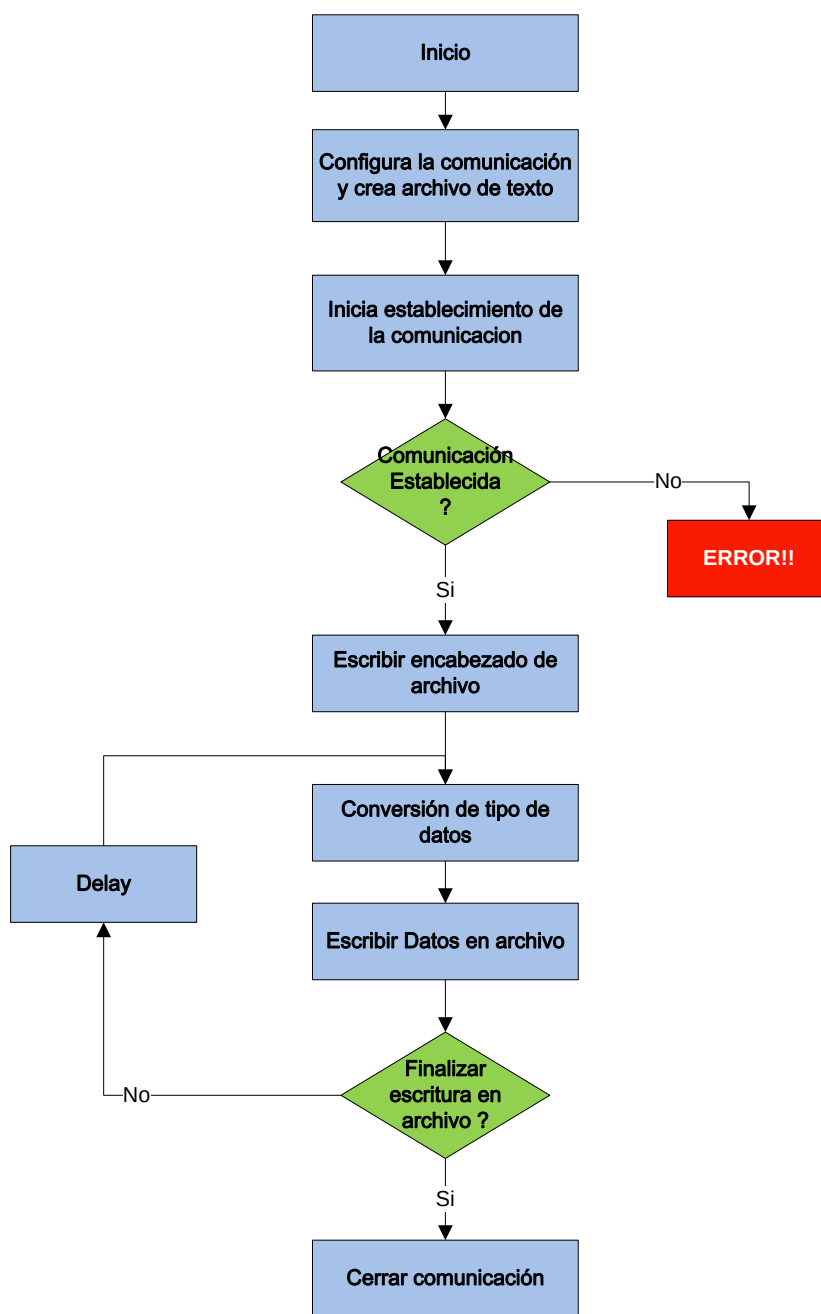


Figura A5. Diagrama para el manejo de archivos de texto.

A2. Controlador Fuzzy.

Al describir ciertos fenómenos solemos utilizar expresiones que nos dan una idea vaga o imprecisa de dicho fenómeno. La lógica fuzzy nos permite modelar estas descripciones imprecisas.

Cotidianamente se realizan actividades que requieren de cierto tipo de control, aun cuando no se cuente con elementos precisos de medición o se tenga conocimiento detallado de las ecuaciones matemáticas que modelen los procesos para realizar estas actividades, sin embargo, es posible realizar tareas que pueden resultar complejas gracias al conocimiento adquirido de la experiencia, el sentido común y mediante la aplicación de un conjunto de reglas definidas de la forma “si...entonces”. Por ejemplo al conducir un vehículo tenemos que “si la **velocidad** es **alta** y la **aceleración** es **pequeña** entonces el **frenado** debe ser **moderado**” donde la velocidad y la aceleración son variables de entrada, el frenado es una variable de salida y expresiones como alta, pequeña, moderado representan conjuntos difusos. El uso de estas sentencias llamadas reglas de inferencia es la base del control fuzzy.

➤ **Selección de las entradas y salidas.** Como primer paso se define la información del proceso que se tendrán en la cuenta para tomar las decisiones. Para nuestro caso en particular asumimos como entradas al controlador fuzzy la señal de error

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

Y la derivada del error

$$\frac{d}{dt} e(t)$$

La salida del controlador es la variable manipulada y que para nuestro solo contamos con la apertura de la válvula con la que variamos el flujo de agua inyectado a la turbina. Como entrada de referencia tenemos entonces la potencia que se desea generar P_{ref} . La figura A6 muestra el esquema del sistema de control Fuzzy una vez determinadas las entradas y salidas del sistema lógico difuso.

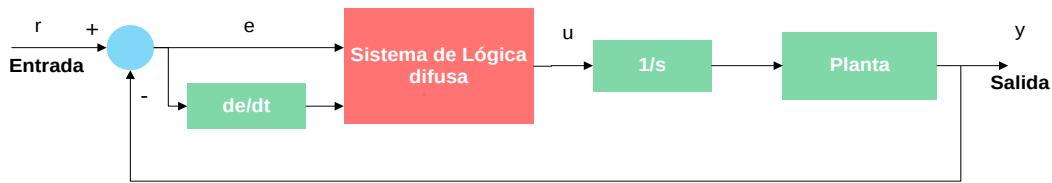


Figura A6 Sistema de control Fuzzy para la potencia de salida.

➤ **Descripciones lingüísticas, base de reglas.** El control fuzzy busca automatizar la forma como una persona realiza una tarea de control, donde la persona a través de su experiencia cuenta con un lenguaje natural para describir la mejor forma de realizar dicho control. En su lenguaje natural (español, inglés, etc.) la persona utiliza descripciones lingüísticas las cuales pueden ser divididas en varias partes, por ejemplo las “variables lingüísticas” que identifican las entradas y salidas del sistema lógico difuso. Para nuestro sistema el “error”, “cambio en el error” y la “válvula” son variables lingüísticas e identifican a $e(t)$, $de(t)/dt$ y a $u(t)$ respectivamente.

La forma cómo cambian estas variables se describe por medio de “valores lingüísticos”. Suponemos que para el control de potencia las variables “error” y “cambio en el error” toman los valores: “Muy Negativo”, “Negativo”, “Cero”, “Positivo” y “Muy Positivo”, mientras que la variable “válvula” toma los valores lingüísticos: “Abrir Mucho”, “Abrir”, “Quieta”, “Cerrar” y “Cerrar Mucho”. Para no hacer muy extensas las descripciones es posible utilizar abreviaturas como se muestra en la tabla A1.

Tabla A1 Descripciones lingüísticas

Variable lingüística	Valor Lingüístico	Abreviatura
“error”; “cambio en el error”	“Muy Negativo”	“MN”
	“Negativo”	“N”
	“Cero”	“Z”
	“Positivo”	“P”
	“Muy Positivo”	“MP”
“válvula”	“Abrir Mucho”	“AM”
	“Abrir”	“A”
	“Quieta”	“Q”
	“Cerrar”	“C”
	“Cerrar Mucho”	“CM”

Lo siguiente es elaborar un conjunto de reglas que encierran todo el conocimiento de cómo controlar la planta. Como se explico anteriormente cada regla está compuesta de un antecedente y un consecuente y tienen la forma “Si.....Entonces”. En el caso de controlar la potencia generada a partir de la posición de la válvula reguladora de caudal tenemos por ejemplo la siguiente expresión para una situación particular:

Si el “error” es “Muy Positivo” y el “cambio en el error” es “Muy Positivo” **Entonces** la “válvula” se debe “Cerrar Mucho”.

O en forma abreviada

Si el “error” es “MP” y el “cambio en el error” es “MP” **Entonces** la “válvula” se debe “CM”.

Esta expresión describe la situación en la que la potencia de salida está muy por debajo de la potencia de referencia y se aleja cada vez más de ella. Así como esta expresión llegamos a tener un total de 25 reglas (5 conjuntos por cada variable de entrada $5^2 = 25$ posibles combinaciones) que conforman entonces la base de reglas del sistema difuso y se resumen en la tabla A2.

Tabla A2. Base de reglas Fuzzy

Reglas		Derivada del Error				
		MN	N	Z	P	MP
Error	MN	AM	AM	AM	AM	AM
	N	AM	AM	A	A	A
	Z	AM	A	Q	C	CM
	P	C	C	C	C	CM
	MP	C	C	C	CM	CM

A los diferentes valores lingüísticos asociados a una función de pertenencia se les denomina *conjuntos difusos* cuyos valores numéricos comprenden determinados rangos que se encuentran dentro del rango en el que puede cambiar la variable lingüística al que se le llama *universo de discurso*.

➤ **Cuantificación fuzzy del conocimiento (funciones de pertenencia).** La cuantificación de los valores lingüísticos se determina por medio de funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencias utilizadas son del tipo triangular como la mostrada en la figura A7y son graficas que relacionan la probabilidad de que una variable lingüística sea “Negativo”, “Muy Negativo”, “Positivo”, etc.

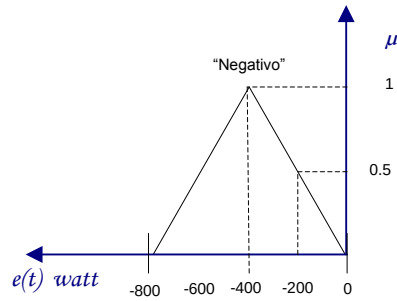


Figura A7. Función de pertenencia triangular para “Negativo”

Vemos que si el error tiene un valor de -400 indica que hay una absoluta certeza de que el valor $e(t) = -400$ es “Negativo” ($\mu(-400)=1$), mientras que si el error toma un valor de -600 la certeza de que el valor $e(t) = -200$ es “Negativo” se reduce a la mitad ($\mu(-200)=0.5$)

La figura A8 nos muestra las funciones de pertenencia para las entradas y la salida del sistema de control fuzzy. El universo de discurso de cada una de las variables lingüísticas está definido en el rango $[-1 \ 1]$, por lo tanto el esquema para el sistema de control difuso se modifica, agregándole las ganancias g_0 , g_1 y h tal como se muestra en la figura A9, esto nos permite realizar un ajuste del controlador al escalar los universos de discurso.

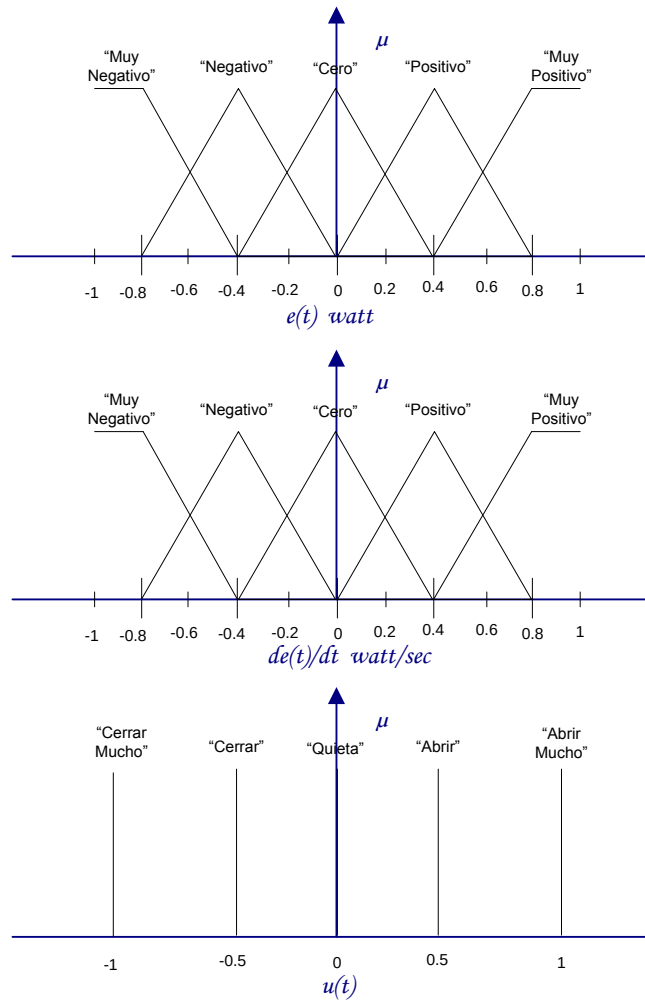


Figura A8. Funciones de pertenencia para el controlador Fuzzy de potencia

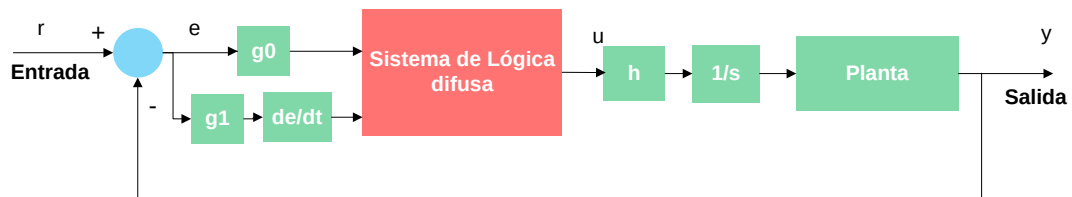


Figura A9. Esquema de control Fuzzy escalando los universos de discurso.

➤ **Determinando qué reglas usar (cuantificación de la premisa, qué reglas están**

activas). En un determinado instante del proceso, las entradas $e(t)$ y $\frac{de(t)}{dt}$ toman valores que activan determinadas reglas. Primeramente el valor de las entradas en un instante es clasificado en alguno de los conjuntos difusos evaluando $\mu_{\text{valores lingüísticos}}(e(t))$ y $\mu_{\text{valores lingüísticos}}\left(\frac{de(t)}{dt}\right)$ por medio de las funciones de pertenencia.

Por ejemplo para $e(t) = 0.4$ y $\frac{de(t)}{dt} = 0.6$

$$\mu_{\text{Positivo}}(e(t)=0.4) = 1$$

$$\mu_{\text{Muy Positivo}}\left(\frac{de(t)}{dt} = 0.6\right) = 0.5$$

Se tiene entonces que el antecedente ...Si el “error” es “Positivo” y el “Cambio en el error” es “Muy Positivo”.... que corresponde a esta situación, se puede cuantificar usando dos métodos: el mínimo o el producto.

Mínimo $\mu_{\text{antecedente}} = \text{Min} \left\{ \mu_{\text{Positivo}}(e(t)) \cdot \mu_{\text{Muy Positivo}}\left(\frac{de(t)}{dt}\right) \right\}$

Producto $\mu_{\text{antecedente}} = \mu_{\text{Positivo}}(e(t)) * \mu_{\text{Muy Positivo}}\left(\frac{de(t)}{dt}\right)$

Si al comparar todas las reglas con los valores que se tienen a la entrada del sistema lógico difuso existen reglas cuya probabilidad del antecedente sea mayor que cero, es decir

$$\mu_{\text{antecedente}}(e(t)); de(t)/dt > 0$$

entonces se dice que dichas reglas son activas y son usadas para tomar las decisiones en el controlador Fuzzy.

Si siguiendo con el ejemplo donde $e(t) = 0.4$ y $\frac{de(t)}{dt} = 0.6$ los términos que aplican para estos valores son: “El error es Positivo”, “El cambio en el error es positivo” y “el cambio en el error es muy positivo” como se muestra en la figura A10, por tanto las reglas que están activas dada esta situación son:

Si el “error” es “Positivo” y el “cambio del error” es “Positivo” Entonces la “válvula” se debe “Cerrar”

Si el “error” es “Positivo” y el “cambio del error” es “Muy Positivo” Entonces la “válvula” se debe “Cerrar Mucho”

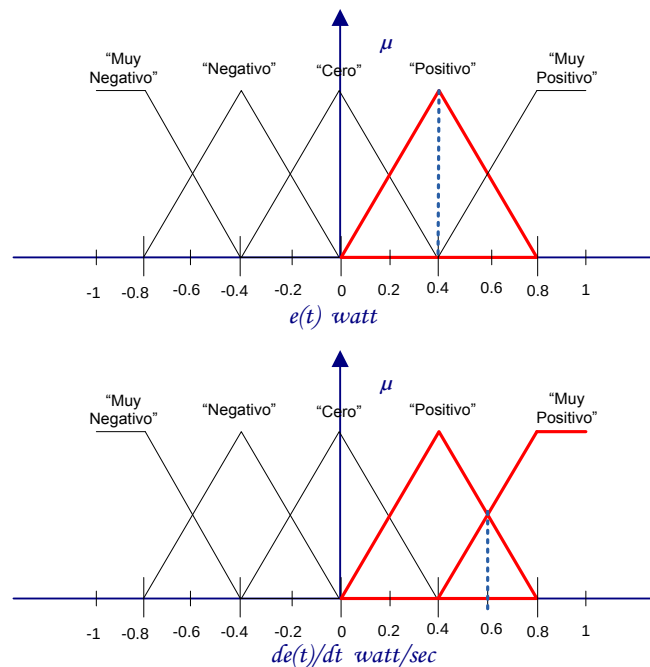


Figura A10. Ejemplo reglas activas en el sistema lógico difuso

➤ **Inferencia (convirtiendo decisiones en acciones).** Cada regla que se activa en el controlador fuzzy recomienda tomar una acción sobre la válvula como por ejemplo cerrar, cerrar mucho, abrir, etc. Cada una de las recomendaciones hechas por las reglas que son activas se combinan para determinar la señal que se debe aplicar a la válvula reguladora de caudal.

El tipo de inferencia utilizado es del tipo Sugeno y el valor de la señal aplicada a la válvula puede calcularse mediante la fórmula:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R Y_i * \mu_i}{\sum_{i=1}^R \mu_i}$$

Donde μ_i es el valor de la probabilidad de la premisa o antecedente de cada regla activa obtenida por el método del producto y Y_i corresponde a un valor constante que se relaciona con cada uno de los valores lingüísticos de la salida como se nota en la figura A8.

Implementación del controlador fuzzy en el SNAP PAC R1. A continuación se explican los pasos realizados en la implementación del controlador fuzzy utilizando los bloques de OptoScripts con los que cuenta la herramienta PAC Control.

Se tienen en cuenta las siguientes definiciones:

$fError$:	Error (entrada del controlador)
$fDerivadaError$:	Derivada del error (entrada del controlador)
$\mu Error[i]$:	Valor de la función de pertenecía asociada a la entrada error para los valores lingüísticos i
$\mu Derivada[j]$:	Valor de la función de pertenecía asociada a la entrada derivada para los valores lingüísticos j
$Y[index]$:	Arreglo con el valor consecuente de cada regla
$W[index]$:	Arreglo con el valor probable de cada antecedente utilizando el método del producto
U :	Salida del controlador

- Calcular el valor de las entradas $fError$ y $fDerivadaError$.
- Calcular el valor $\mu Error[i]$ y $\mu Derivada[j]$ para i y j dado un valor para las entradas del controlador $fError$ y $fDerivadaError$.
- Para $i = 0$ hasta $i = 4$; Para $j = 0$ hasta $j = 4$ calcular

$$W[index] = \mu Error[i] * \mu Derivada[j]$$

$$V[index] = W[index] * Y[index]$$

donde $index: 0$ a 24

- Calcular $NUM = SUM(V[index])$ y $DEN = SUM(W[index])$
- Hallar la salida del controlador $U = \frac{NUM}{DEN}$

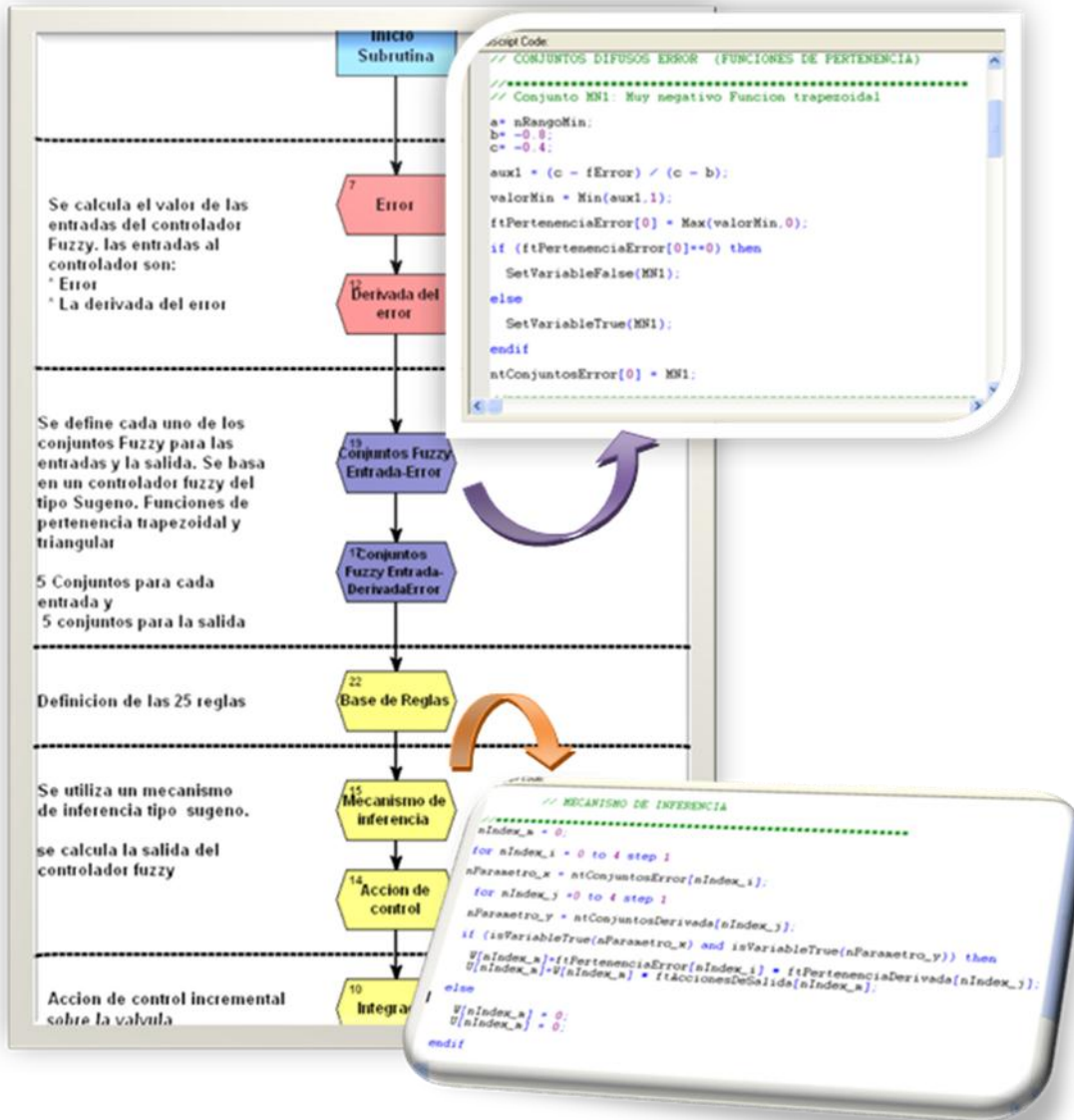


Figura A11 Subrutina ControladorFuzzy

La figura A11 muestra el diagrama del controlador fuzzy desarrollado como una subrutina donde se halla el código OptoScript que permite realizar los pasos mencionados

anteriormente. El llamado a la subrutina del controlador fuzzy se hace desde el diagrama *Secuencia_Operación* por medio de la función *Call* (llamado de subrutina).

A3

UNIVERSIDAD DEL VALLE

COMPENDIO DE GUIAS DE LABORATORIO

DEL

LABORATORIO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS

ELABORADO POR: CARLOS ANTONIO CASTAÑO BARRERA Ing.

**ESTUDIANTE DE LA MAESTRIA
PARA: LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL TRABAJO DE LABORATORIO

Siempre que alguien se disponga a trabajar en un laboratorio debe ser consciente que se somete a determinados riesgos que pueden ser minimizados o reducidos completamente, si tiene en cuenta ciertas precauciones elementales, de las cuales, algunas se exponen a continuación:

1. La asistencia y puntualidad a las sesiones del laboratorio, son obligatorias.
2. Las prácticas son realizadas por los estudiantes en grupos conformados en la primera sesión, los cuales no deben cambiarse sin la autorización del profesor.
3. Cada estudiante tiene la obligación de leer cuidadosamente la guía de la correspondiente práctica en forma individual antes del inicio de la sesión de laboratorio, y debe saber que va a hacer.
4. Ningún estudiante podrá retirarse del laboratorio antes de que el grupo haya terminado completamente la toma de datos y los ejercicios asignados por el profesor.
5. Cada grupo de trabajo debe tener los elementos necesarios para la ejecución de la práctica, de igual manera todos elementos que se le hayan prestado debe regresarlos al finalizar la práctica.
6. Cada estudiante debe ser muy cuidadoso en la manipulación de los aparatos y elementos de laboratorio. En caso de dudas debe consultar al profesor. Los daños y pérdidas en materiales y equipos de laboratorio serán pagados por el estudiante o por los miembros del grupo que los recibieron.
7. Está prohibido fumar y/o comer en la aula de laboratorio o realizar otras acciones que dificulten el desarrollo de las sesiones de laboratorio.
8. todos los informes deben ser presentados en un formato tipo artículo.

LABORATORIO

Prueba hidrostática en una central hidroeléctrica.

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Mediante acciones concretas para mantener las condiciones de seguridad en las instalaciones de una central hidroeléctrica, dentro de sus principales actividades que son consideradas de riesgos por su naturaleza, se debe confirmar la integridad estructural y hermeticidad de los equipos, sistemas y componentes que realizan la conducción del agua, con la finalidad de garantizar la confiabilidad de los procesos durante su operación normal. Lo anterior se logra mediante diversos ensayos no destructivos y pruebas hidrostáticas que consisten en someter a las tuberías, equipos y componentes de proceso asociados, a una prueba de presión interior para evidenciar que puedan ser operados cotidianamente en forma confiable y segura de acuerdo a las normas, especificaciones, códigos o estándares aplicables.

PROCEDIMIENTO

Limpieza interna de la tubería de presión a fin de eliminar residuos o cualquier otro material

Se procederá a soldar la brida ciega a la tubería en el tramo inmediatamente después de la cámara de carga, instalándose en este lugar la bomba de prueba

Se instalan dos manómetros, uno en la parte inferior de la tubería (antes de la válvula) y otro en la salida de la bomba de prueba

Proceder con el cierre hermético de las dos válvulas mariposas instaladas, a fin de evitar el ingreso de agua a las turbinas. Un día antes de la prueba se llenará de agua lentamente la tubería. A fin de conseguir un llenado completo de la tubería se llenará con agua el tramo antes de la bomba de prueba, purgando el aire de la tubería

Cerrar el miple de ventilación de la tubería ciega

Se incrementará la presión hasta 1.3 veces la presión estática máxima con que operará la tubería. Esta presión se mantendrá durante dos horas para permitir la inspección detallada de todas las juntas de soldadura que deben estar libres de goteo y otros defectos

A fin de llevar un registro, se deben enumerar los cordones de soldadura circunferenciales a lo largo de toda la tubería de presión y sus complementos, desde aguas arriba hacia aguas abajo, en forma correlativa y colocarse las observaciones que ocurran entre ellos durante la prueba. Para la verificación se destinará personal a lo largo de la tubería de presión mientras duren las pruebas

Luego de la revisión del correcto funcionamiento de las juntas se evacuará el agua lentamente por el tubo de purga, dando por culminada la prueba

Terminada la prueba se procederá a retirar la brida ciega y se instalará la junta de dilatación del tipo fijo

PUNTOS A DESARROLLAR

Realice las actividades planteadas en el procedimiento anterior y determine en una tabla dos datos y comportamientos de los elementos involucrados en las pruebas antes mencionadas.

BIBLIOGRAFÍA

Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de micro centrales hidroeléctricas. Lima: Soluciones Prácticas, 2010.

LABORATORIO

CONOCIMIENTO GENERAL DE LOS ELEMENTOS DEL LABORATORIO

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

El desarrollo energético de un país está acompañado con investigación y desarrollo en las áreas en las cuales disponen sus recursos. Esta etapa de desarrollo requiere proveer espacios para la investigación, en los cuales se actualizan y optimizan los procedimientos de conversión de energía; a la vez que permite formar profesionales acordes con las nuevas necesidades energéticas. Estos espacios usualmente se encuentran en laboratorios de investigación, algunos de ellos especializados en un área de conocimiento o aquellos que investigan la generalidad del proceso de conversión de energía.

En Colombia se tienen equipos para mostrar el principio de conversión de energía en una central hidroeléctrica, los más recientes se ubican en el museo interactivo de las Empresas Publicas de Medellín. Sin embargo, la finalidad del museo, no permite que a través de estos equipos se pueda llegar a capacitar e investigar. Además de este equipo, al interior de las Empresas Publicas de Medellín, se tiene una unidad de capacitación, destinada a preparar sus operarios, en el manejo de sus plantas y subestaciones a un nivel técnico. la universidad del Valle cuenta con un laboratorio que muestra los principios de conversión de la energía hidráulica, que permite la investigación, el conocimiento y la capacitación. Este sistema de generación es completamente automatizado y permite el trabajo local (estación local de control) o remoto a través de una interfaz Web.

Toda la operación y control se enmarcan dentro de las normas internacionales las cuales son: La norma IEEE 1010 de 1987 describe los sistemas de monitoreo y control típicos que debe tener una central hidroeléctrica en general, sus jerarquías, requerimientos, secuencias de arranque y paro; la norma IEEE 1020 entrega una metodología para la puesta en marcha y control típico que debe tener una pequeña central hidroeléctrica

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL LABORATORIO DE PCHS DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

El laboratorio en la Universidad del Valle, funciona de manera totalmente automática; Se compone de una tubería y de uno acople flexible que permiten la circulación cerrada de agua. El agua es impulsada a través de la tubería por medio de una bomba, cuya capacidad nominal de bombeo es de 1000 litros por minuto, que es movida por un motor, que cuenta con variador de velocidad.

El agua en la tubería, se lleva a la turbina (turbina pelton o bomba trabajando como turbina), la cual, por medio de un acople mecánico, hace girar un motor asíncrono.

También cuenta con una serie de válvulas, que permiten variar el flujo de agua que llega a la turbina, al permitir o no su desvío. Un diagrama del sistema se puede apreciar en la figura 1.

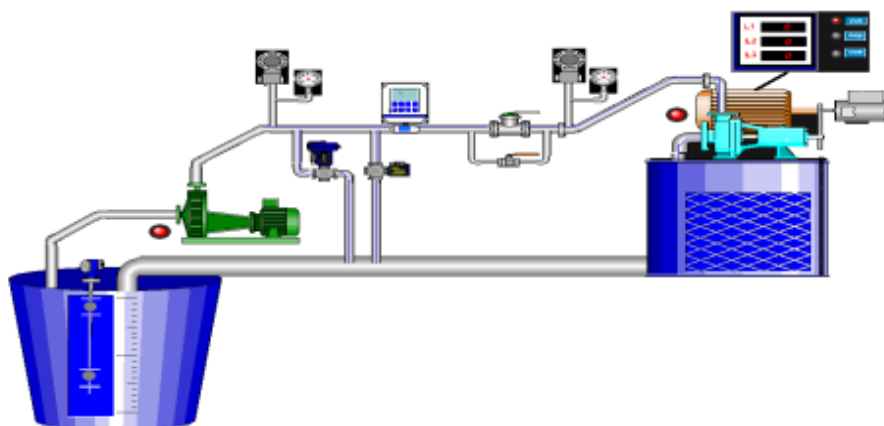


Fig. 1 Diagrama del sistema.

Cuenta con dos manómetros para la medición de presión. Cuenta con dos tanques, uno el principal, donde se tiene el agua almacenada, y el segundo, el tanque de aguas turbinadas. Este sistema lo podremos repartir en tres grandes subsistemas, que son:

Subsistema de circulación de agua

Permite la circulación del agua por los diferentes elementos, del laboratorio proporcionando el caudal necesario para el funcionamiento del sistema; este es el encargado de conducir tanto las aguas a turbinar como las aguas ya turbinadas, en un ciclo cerrado. Este esta Constituido por los siguientes elementos:

- Tanque principal: con una capacidad de 2000 litros.
- Tanque para aguas turbinadas: con capacidad para 110 litros.
- Tubería de presión: la longitud es de 6 metros, con espesor de 3 milímetros y un diámetro de 3 pulgadas.
- Tubería de baja presión: encargada de regresar las aguas desde el tanque de aguas turbinadas hasta el principal. Con un diámetro de 12 pulgadas y una longitud de 9 metros.
- válvulas: Válvula (V2) con su respectivo By-pass (V3), Válvula de alivio o seguridad (Vs), Válvula reguladora de caudal (V1).

Subsistema hidro-energético

Con formado por el grupo bomba – motor que proporcionan la energía potencial al agua, dando como resultado un caudal proporcional a 1000 litros por minuto y una caída aproximada de 40 metros.

Subsistema de generación

El agua en la tubería, se lleva a la turbina (turbina pelton o bomba trabajando como turbina), la cual, por medio de un acople mecánico (poleas y banda), hace girar un motor asíncrono que trabaja en régimen de generador. Como el sistema cuenta con una serie de válvulas, que permiten variar el flujo de agua que llega a la turbina, y así regulando la potencia. Un diagrama del sistema se puede apreciar en el gráfico 1.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para todas las prácticas contaremos con el espacio de trabajo conocido como laboratorio de pequeñas centrales, ubicado en el edificio 353 espacio 1013 de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. En este contaremos con los equipos de control y actuación necesarios para la realización de laboratorios orientados al fortalecimiento de las habilidades teóricas y prácticas en el proceso de la generación hidroeléctrica.

3. PROCEDIMIENTO

1. El monitor o profesor orientara sobre el conocimiento de las diferentes partes que constituyen el equipo experimental del laboratorio.
2. Se debe tomar los nombres y valores de los diferentes equipos de trabajo.

4. PUNTOS A DESARROLLAR

1. investigue el funcionamiento de los equipos que actúan en el proceso del laboratorio, que funcionan como sensores o actuadores.
2. Llene la siguiente tabla:

d. sensor de presión.

Nombre:	Modelo:
Serial:	Rango de trabajo:
Rafing:	Fill:

e. Sensor de caudal.

Nombre:	Modelo:
Voltaje:	Frecuencia:
Potencia de consumo:	Señal de control:

f. Grupo generador

GENERADOR ASINCRONO.	SINCRONO	O	BOMBA O TURBINA
Marca:			Marca:
Serie:	Tipo:		Serie:
HP:			Diámetro de entrada:
RPM:			Diámetro de salida:
Numero de Polos:			Rango de funcionamiento:
Frecuencia:			
Voltaje:			
Amperio:			

g. Tacómetro.

Marca:
serial
Corriente máxima
Velocidad máxima
V/tr/mn

4. Realice una descripción general del funcionamiento de la planta de generación.
5. Determine las diferencias de funcionamiento entre las turbinas (francis, pelton, y kaplan) y las bombas funcionando como turbina.

bibliografía

Ortiz F Ramiro. PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS. Mc Graw Hill Interamericana. Colombia.2001.

Blanco Jorge, Bolaños Esteban, Chávez Arturo, SISTEMAS DE CONTROL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA BRASIL DE LA C.N.F.L., Monografía, Universidad de Costa Rica. 2004.

Kaschel Héctor, Pinto Ernesto, ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LOS BUSES DE CAMPO APLICADOS AL CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES, Articulo, Universidad de Santiago de Chile

Modesti Mario, SISTEMAS DE COMUNICACIÓN POR BUS DE CAMPO, monografía Creus S Antonio, INSTRUMENTACION INDUSTRIAL, 1997

Smar International, 2005, SMART PRESSURE TRANSMITTERS LD290, Ficha técnica

Smar International, 2005, SMART VALVE POSITIONER FY301, Ficha técnica.

LABORATORIO

Conocimiento y manejo de la estrategia de control del sistema

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Como se introdujo en el laboratorio anterior, el sistema cuenta con la instrumentación necesaria que permite la manipulación de las variables de interés. Las variables más importantes de sensado para el sistema son: flujo de agua, corriente en el generador, tensión en el generador, presión en la tubería, nivel del tanque principal, potencia eléctrica suministrada por el generador. Para realizar la operación del sistema, se deben controlar las señales: contactor C1 (on/off), contactor C2 (on/off), contactor C3 (on/off) y la válvula variable V1 (ver esquemático en la figura 1). Toda esta estrategia de control es realizada por el Pac, a través del programa opto 22.

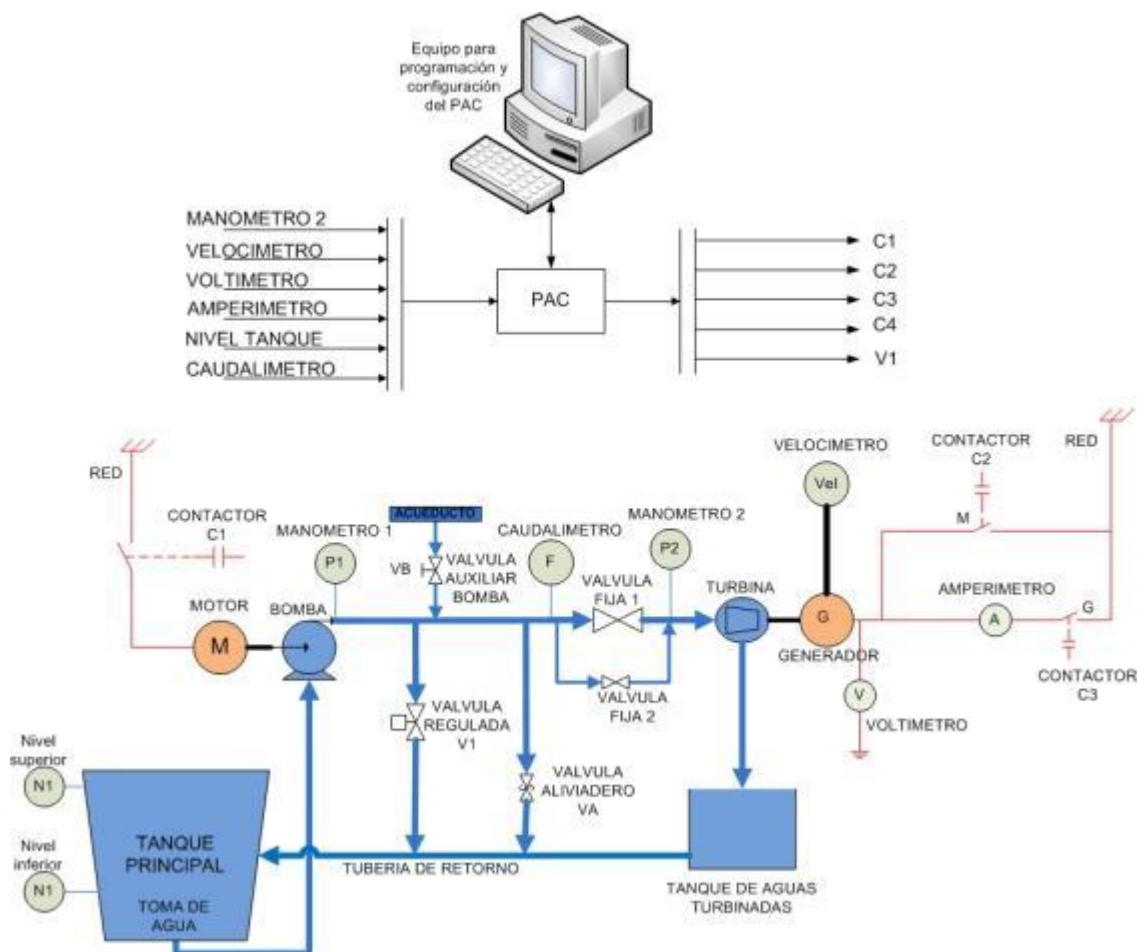


Figura 1. Esquema general del SGEH.

DESCRIPCIÓN GENERAL SECUENCIA DE OPERACIÓN DEL SGEH

En el proceso de operación del SGEH se sigue de manera general el protocolo de operación de centrales hidroeléctricas, estándar IEEE 1010. Antes de iniciar la operación, se escoge el modo de ejecutarlo, ya sea automático o semiautomático. El modo automático, no requiere de mucha intervención del operador; por el contrario, el modo semiautomático requiere de intervención del operador para avanzar de un estado a otro en la secuencia. Esta secuencia se caracteriza (en modo automático semiautomático) por seguir las etapas de verificación de condiciones iniciales, ejecutada antes de poner en funcionamiento la planta; seguido se inicia el proceso de arranque de la planta, para luego ser conectada a la red. En este estado, se fija la potencia deseada a la salida del generador, quedando en éste por el tiempo que sea necesario. Finalmente, se tiene la secuencia de parada, en la que la planta es llevada a las condiciones iniciales antes del encendido, quedando de esta manera preparada para repetir todo el proceso.

De manera más detallada, se realizan las siguientes acciones en cada una de las etapas mencionadas.

Inicialmente se verifica condiciones de arranque

- Verificación que el grupo turbina-generador esté detenido $N = 0$ rpm
- La corriente en el generador sea cero ($I_{gen}=0$)
- nivel del tanque en el nivel superior. $N = N1$
- La válvula de regulación V1 totalmente abierta
- Los contactores C1 C2 y C3 abiertos

Proceso de arranque, que se ejecuta cuando las condiciones iniciales se han cumplido

- Se cierra el contactor C1
- Se espera unos segundos a que la bomba se autocebe (se detecte flujo de agua en la tubería)
- La válvula V1 se cierra hasta velocidad del generador = 1750 rpm (aproximadamente 95% de la velocidad nominal del motor)

Una vez se encuentra en este estado, se realiza la conexión a la red del equipo de generación como motor, logrando de esta manera una sincronización con la red.

- Se cierra el contactor C2
- C3 se cierra unos segundos después de haber cerrado C2
- C2 se abre (estrategia de protección del amperímetro)

Una vez sincronizado con la red en frecuencia y voltaje, se procede a dar una referencia de potencia deseada a la salida del generador. En este caso:

- Si la variación de REF POT es positiva, cerrar válvula para aumentar el flujo de agua hacia la turbina.

- Si la variación de REF POT es negativa, abrir válvula para disminuir el flujo de agua a la turbina

Finalmente la planta se apaga normalmente siguiendo los siguientes pasos:

- V1 se abre hasta que la velocidad del generador alcance las 1800 rpm
- C2 se cierra
- C3 se abre
- C2 se abre, lo que finalmente desconecta al generador de la red
- V1 se abre totalmente para reducir al mínimo valor la velocidad del grupo.
- Por último se abre C1, lo que apaga la bomba que impulsa el agua hacia la turbina

En apagado de emergencia, se realiza lo siguiente:

- Se liberan todos los contactores al tiempo y la válvula se abre al 100%
- Se regresa a condiciones iniciales.

En todo el proceso de operaciones hace verificación de los estados de las variables para la detección de fallas y sacar reportes de error, lo cual, detiene el equipo al apagarlo de emergencia.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Como se menciona en la práctica anterior contaremos con el espacio de trabajo conocido como laboratorio de pequeñas centrales, ubicado en el edificio 353 espacio 1013 de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. En este se cuenta con los equipos de control y actuación necesarios para la realización de laboratorios orientados al fortalecimiento de las habilidades teóricas y prácticas en el proceso de la generación hidroeléctrica.

1. Se encuentra la planta de generación con la instrumentación, para el control y la generación.
2. En el centro de control local, se encuentran ubicados dos computadores que cumplen las siguientes funciones.
 - El computador HP pavilion slimline, como auxiliar de trabajo o como estación de trabajo.
 - El computador HP pavilion TV PC, como servidor y pc para el control de la estrategia de control del sistema de generación

PROCEDIMIENTO

1. Antes de iniciar la prueba asegúrese que los elementos que constituyen la planta se encuentren debidamente ajustados para evitar fugas del fluido y un posible daño.
2. Verifique que el motor que funciona como generador se encuentre conectado a la red, para evitar un posible envalamamiento.
3. Proceda a encender el interruptor principal de la planta; y los interruptores auxiliares dentro de la caja donde se aloja el PLC. Debe encenderse la pantalla del Lovato y mostrar los valores de voltaje en la red (220 V).

4. Verifique que el interruptor de paro general del laboratorio se encuentre deshabilitado.

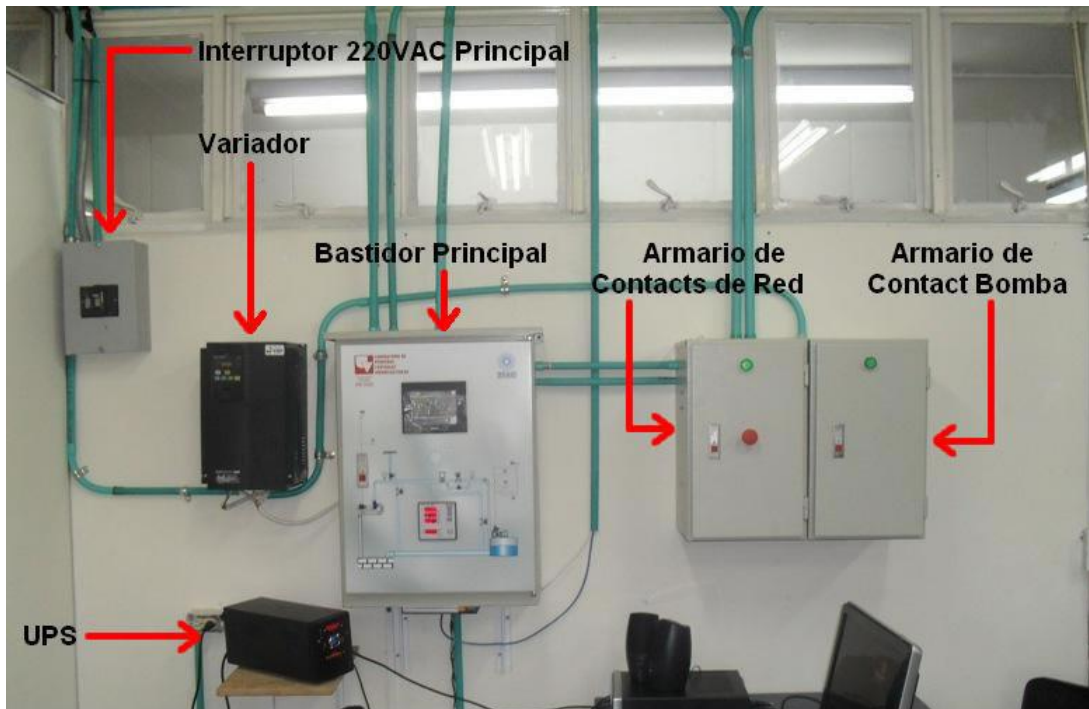


Figura 1. Ubicación general de los gabinetes del sistema de generación.

5. En el computador que funciona como servidor, realice la siguiente secuencia de acciones para colocar a funcionar la planta:
- Valla a inicio>todos los programas>opto 22>PAC project 8.5>PAC Display Runtime Pro .lnk, las tareas aparecen en la grafica 2 siguiente.

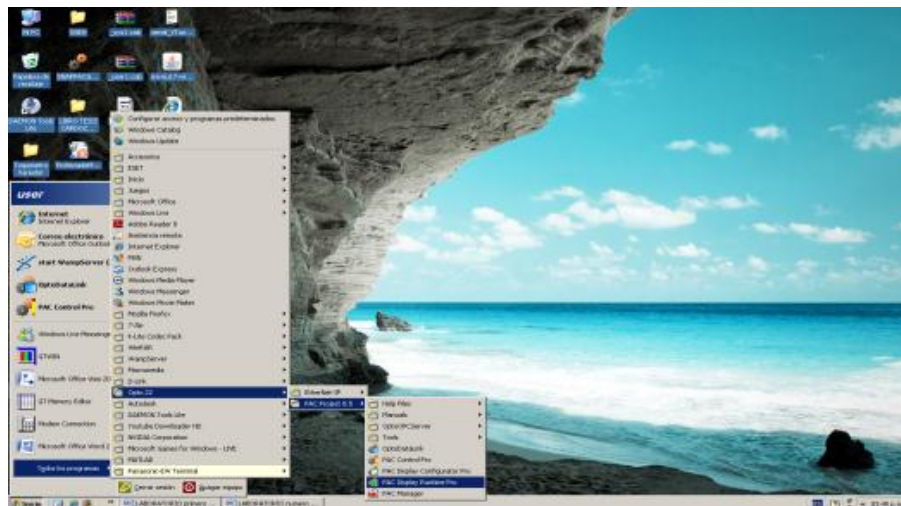


Figura 2 pantalla principal del servidor

6. Se activa y aparece en la pantalla una imagen igual a la siguiente:



Figura 3 pantalla principal de la interfaz de control del laboratorio.

- Tanque de aguas principal (1).
- Tanque de aguas turbinadas (2).
- Sistema de tuberías (3).
- Motobomba (4).
- Grupo Turbina-Generador (5).
- Sensor de nivel (6).
- Transmisor de presión P1 – Presión Bomba (7).
- Transmisor de Presión P2 – Presión turbina (8).
- Sensor de caudal (9).
- Taco generador (10).
- Medidor de variables eléctricas (11).
- Válvula de control (12).
- Válvula esférica y de Bypass (13).

Esta es la pagina principal, donde se puede encontrar el grafico general del sistema (1), un panel que permite encontrar las variables de voltaje, corriente y potencia (2), en la parte inferior izquierda los botones que permiten desplazarse por las diferentes ventanas y un botón especial que da via libre al funcionamiento de la SGEH, en la parte inferior derecha se encuentran dos botones que permiten grabar los datos que proporcionan las variables (rev – stop), y centrado un botón que indica el tipo de control con el que va a funcionar la estrategia (manual, semiautomático o automático), y por ultimo dos pulsadores que permiten arrancar (run) y otro que la detiene (abandonar secuencia).

Cuando presionamos el botón secuencia de cualquiera de las ventanas de la interfaz, encontraremos la siguiente imagen



Figura 4 pantalla de control de secuencia del sistema

En esta podemos encontrar toda la estructura secuencial o estado de funcionamiento del sistema, como se puede observar se encuentra distribuida, en recuadros de acuerdo al estado de avance de la secuencia (pre-arranque, arranque del sistema, conexión del sistema a la red, operación del sistema y desconexión del sistema). Además se encuentra un panel de medidas de las variables más importantes del funcionamiento.

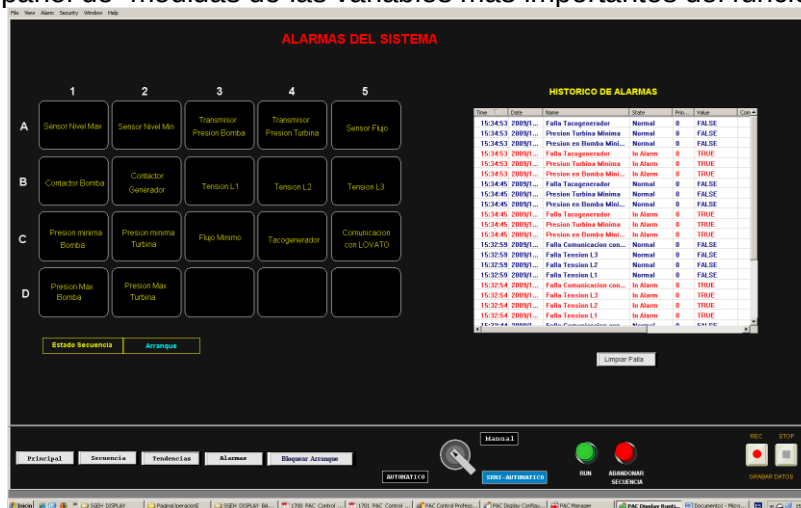


Figura 5 pantalla de alarmas del sistema.

En esta pantalla aparecen las alarmas del sistema en la parte izquierda de la pantalla, y en la parte derecha el histórico de alarmas, debajo de este cuadro de históricos se encuentra un botón que permite limpiar la falla presentada, pero siempre se debe tener en cuenta que se haya superado la falla presentada, para reiniciar con la secuencia de arranque. Por último se encuentra una pantalla figura 6, de donde se puede mirar las diferentes graficas para la variables que intervienen en el proceso.

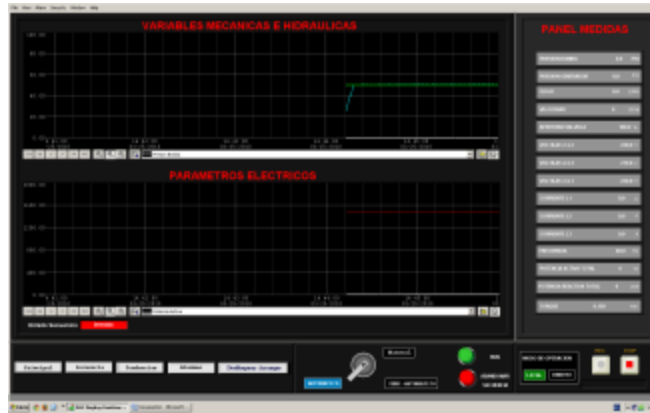


Figura 6 tendencias del proceso

PUNTOS A DESARROLLAR

1. Arranque el sistema con el botón de control en posición de semiautomático, tome los datos de tiempo necesario para cada una de las partes de funcionamiento (pre arranque, arranque del sistema).
2. Encienda guardar datos y estando en el arranque del sistema, cierre la válvula de forma uno a uno porcentual con las flechas  hasta que el sistema alcance 1760 rpm. Con los valores grabados grafique caudal vs velocidad, y halle las constantes de la grafica.
3. Realice la maniobra de conexión del sistema a la red y en operación del sistema aumente el caudal (como se hizo en arranque del sistema) hasta que el sistema entregue una potencia activa de 1.4 kW. Escriba el procedimiento y haga sus observaciones pertinentes al funcionamiento del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Diseño de un sistema automático de control para la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica, Félix Andrés Correa Valencia, Alejandro Rafael García Ibarra

LABORATORIO

PÉRDIDAS EN LA TUBERÍA DE PRESIÓN

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

A continuación se definen ciertos términos necesarios para la interpretación del presente laboratorio.

Fluido: los fluidos son sustancias capaces de "fluir" y que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen.

Presión de un fluido: la presión de un fluido se transmite con igual intensidad en todas direcciones y actúa normalmente a cualquier superficie plana. En el mismo plano horizontal, el valor de la presión de un líquido es igual en cualquier punto.

Viscosidad: la viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del escurrimiento, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento; además, indica, la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto a uno laminar y la posición relativa de este estado de cosas a lo largo de determinada longitud; El número de Reynolds es una cantidad adimensional, por lo cual todas las cantidades deben estar expresadas en el mismo sistema de unidades.

$$Re = \frac{D * V}{\nu}$$

En donde

D = es el diámetro interno de la tubería.

V = es la velocidad media del fluido dentro de la tubería

ν = es la viscosidad cinemática del fluido.

La presencia de resistencia al flujo en los tubos, es ofrecida por los tramos largos y los accesorios de tuberías tales como codos, uniones y válvulas, que disipan energía al producir turbulencias a escala relativamente grandes.

A partir del Teorema de Conservación de la Energía se obtiene la ecuación general de Bernoulli en tuberías que expresa el movimiento de fluidos incompresibles en tubos es:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 + h_f$$

Donde Cada termino en esta ecuación tiene las siguiente unidades [N*m/N] es decir [m] o [pie]

Z = término de la elevación, está relacionado con la energía potencial de la partícula y se denomina carga de altura.

$P/\rho \cdot g$ = término de la presión; se denomina carga o cabeza de presión y representa la altura de una columna de fluido necesaria para producir la presión P.

$V^2/2g$ = término de la velocidad es la carga de velocidad (altura dinámica) y representa la distancia vertical necesaria para que el fluido caiga libremente (sin considerar la fricción) si ha de alcanzar una velocidad V partiendo del reposo.

h_f = representa la cabeza de pérdidas por fricción.

En esta guía se analizará solamente las pérdidas de energía en tuberías. Éstas se pueden dividir en dos grandes grupos, pérdidas singulares y pérdidas friccionales.

Pérdidas de carga en singularidades se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas...) y que se deben a fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico (K):

$$h = K \cdot (v^2 / 2g)$$

En donde:

h: pérdida de carga o de energía (m)

K: coeficiente empírico (adimensional)

v: velocidad media del flujo (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s²)

El coeficiente "K" depende del tipo de singularidad y de la velocidad media en el interior de la tubería. En la siguiente tabla se resumen los valores aproximados de "K" para cálculos rápidos:

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES		
Accidente	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

Las pérdidas friccionales se originan en la existencia de un esfuerzo de corte entre el líquido y las paredes de la tubería, que se opone al movimiento una de las fórmulas más exactas para cálculos hidráulicos es la de Darcy-Weisbach. Sin embargo por su complejidad en el cálculo del coeficiente "f" de fricción. Aún así, se puede utilizar para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías de fundición. La fórmula original es:

$$h = f \cdot (L / D) \cdot (v^2 / 2g)$$

En función del caudal la expresión queda de la siguiente forma:

$$h = 0,0826 \cdot f \cdot (Q^2/D^5) \cdot L$$

En donde:

h: pérdida de carga o de energía (m)

f: coeficiente de fricción (adimensional)

L: longitud de la tubería (m)

D: diámetro interno de la tubería (m)

v: velocidad media (m/s)

g: aceleración de la gravedad (m/s²)

Q: caudal (m³/s)

El coeficiente de fricción f es función del número de Reynolds (Re) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería (ϵ_r):

$$f = f(Re, \epsilon_r); \quad Re = D \cdot v \cdot \rho / \mu; \quad \epsilon_r = \epsilon / D$$

ρ : densidad del agua (kg/m³).

μ : viscosidad del agua (N·s/m²).

ϵ : rugosidad absoluta de la tubería (m), en nuestro caso Hierro galvanizado (0,06-0,24) en mm.

Otra forma del cálculo de Las pérdidas friccionales es el método de Hazen-Williams que es válido solamente para el agua que fluye en las temperaturas ordinarias (5 °C - 25 °C). La fórmula es sencilla y su cálculo es simple debido a que el coeficiente de rugosidad "C" no es función de la velocidad ni del diámetro de la tubería. Es útil en el cálculo de pérdidas de carga en tuberías para redes de distribución de diversos materiales, especialmente de fundición y acero:

$$h = 10,674 \cdot [Q^{1,852} / (C^{1,852} \cdot D^{4,871})] \cdot L$$

En donde:

- h: pérdida de carga o de energía (m)
- Q: caudal (m³/s)
- C: coeficiente de rugosidad (adimensional)
- D: diámetro interno de la tubería (m)
- L: longitud de la tubería (m)

En la siguiente tabla se muestran los valores del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams para diferentes materiales:

COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS PARA ALGUNOS MATERIALES				
Material	C		Material	C
Asbesto cemento	140		Hierro galvanizado	120
Latón	130-140		Vidrio	140
Ladrillo de saneamiento	100		Plomo	130-140
Hierro fundido, nuevo	130		Plástico (PE, PVC)	140-150
Hierro fundido, 10 años de edad	107-113		Tubería lisa nueva	140
Hierro fundido, 20 años de edad	89-100		Acero nuevo	140-150
Hierro fundido, 30 años de edad	75-90		Acero	130
Hierro fundido, 40 años de edad	64-83		Acero rolado	110
Concreto	120-140		Lata	130
Cobre	130-140		Madera	120
Hierro dúctil	120		Hormigón	120-140

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El sistema de generación del laboratorio consiste en un sistema de ciclo cerrado cuyo fluido es impulsado por una bomba centrífuga, con un caudal máximo de 1000 lt/min; dicha bomba es impulsada por un motor eléctrico marca General electric acoplado por medio de poleas a la bomba, trifásico de 25 HP. La velocidad de giro del motor es variable entre 0 rpm y 1760 rpm.

La tubería en análisis tiene una distancia de 2.4 metros aproximadamente, el fluido que circula a través de la tubería es agua común a temperatura ambiente (densidad de 1000 Kg/m³, viscosidad cinemática de $1 \cdot 10^{-6}$ m²/s). Para medir la diferencia de presiones se utiliza un sistema de dos medidores digitales que proporcionan las medidas en PSI. Para la medida del caudal se cuenta con un equipo de medida calibrado que muestra este en lt/min.

La variación del caudal la realizamos con una válvula motorizada y un variador de velocidad que ejerce control sobre el motor que mueve la bomba, que para esta prueba se utilizan en los porcentajes de apertura total (100%) para la bomba motorizada y de 32 hasta 60 Hz para el motor; esto hasta el que la velocidad en el generador sea cercana a los 1800 rpm, que es tomada por el taco generador (+/- 45% apertura de la válvula).



Figura 1: válvula para el control del caudal

En la siguiente foto se observan las tomas de presión, a la izquierda la toma de presión 2 y a la derecha la toma de presión 1.

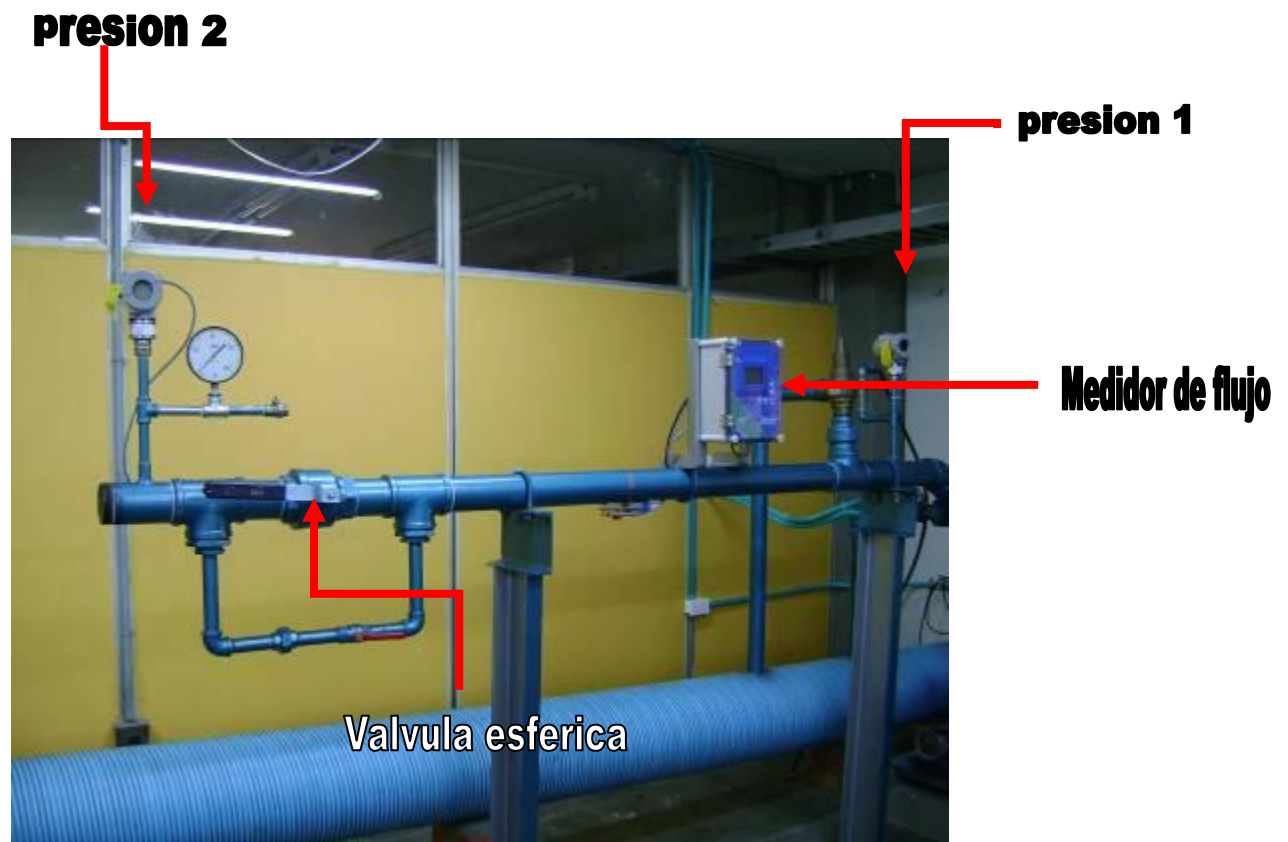


Figura 2: planta de generación hidroeléctrica.

3. PROCEDIMIENTO

- Antes de iniciar la prueba asegúrese que los elementos que constituyen la planta se encuentren debidamente ajustados para evitar fugas del fluido y un posible daño.
- Encienda la planta, subiendo el interruptor general del sistema y de los sistemas de medida de tablero de control, encienda el computador (servidor) y corra la estrategia de control de operación de la planta como lo hizo en el laboratorio anterior.
- Después de que la planta haya comenzado a trabajar espere 1 minuto para comenzar con el proceso de cerrado de la válvula, Tome los datos de diferencia de presión y caudal para porcentajes entre 100% y hasta que la velocidad en el motor este en las 1800 rpm, entre más mediciones tome mejor será la aproximación de la curva experimental.
- Una vez se ha terminado la toma de datos, se debe apagar la planta y bajar los interruptores de los equipos de medida y de potencia.
- En el equipo servidor no se debe colocar ningún equipo de guardado de datos

4 PUNTOS A DESARROLLAR

- 1 Graficar las líneas de energía de la tubería.
- 2 Ecuaciones utilizadas en los cálculos de las pérdidas por fricción.
- 3 Curvas obtenidas de factor de fricción teórica vs. Número de Reynolds y factor de fricción experimental vs. Número de Reynolds.
- 4 Determinar los coeficientes de pérdida singular en las diferentes singularidades.
- 5 Analizar para cada una de estas pérdidas la dependencia con la geometría (en el caso de las curvas) y con el número de Reynolds.

bibliografía

STREETER Víctor. Mecánica de fluidos. México D.F: Mc Graw Hill, 1979.

MUNSON Bruce, YOUNG Donald y OKIISHI Theodore. Fundamentos de Mecánica de fluidos. México D.F: Limusa Wiley, 1999.

LABORATORIO

ENSAYO DE LA TURBINA PELTON

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Las turbinas hidráulicas, junto con los molinos de viento, son las turbo máquinas más antiguas que existen. Se puede explicar su antigüedad por la gran disponibilidad geográfica de las cuencas hidrológicas, siendo los viejos molinos de agua un lugar común.

Una turbina hidráulica es una turbo máquina motora hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, así son el órgano fundamental de una Central hidroeléctrica. En el lenguaje común de las turbinas hidráulicas se suele hablar en función de las siguientes clasificaciones:

De acuerdo al cambio de presión en el rodete o al grado de reacción

Turbinas de acción: Son aquellas en las que el *fluido de trabajo* no sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete.

Turbinas de reacción: Son aquellas en las que el *fluido de trabajo* si sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete.

Para clasificar a una turbina dentro de esta categoría se requiere calcular el grado de reacción de la misma. Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua, mientras que las de reacción aprovechan además la pérdida de presión que se produce en su interior. Los tipos más importantes son:

Turbina Kaplan: son turbinas axiales, que tienen la particularidad de poder variar el ángulo de sus palas durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua pequeños y con grandes caudales.(Turbina de reacción)

Turbina Hélice: son exactamente iguales a las turbinas kaplan, pero a diferencia de estas, no son capaces de variar el ángulo de sus palas.

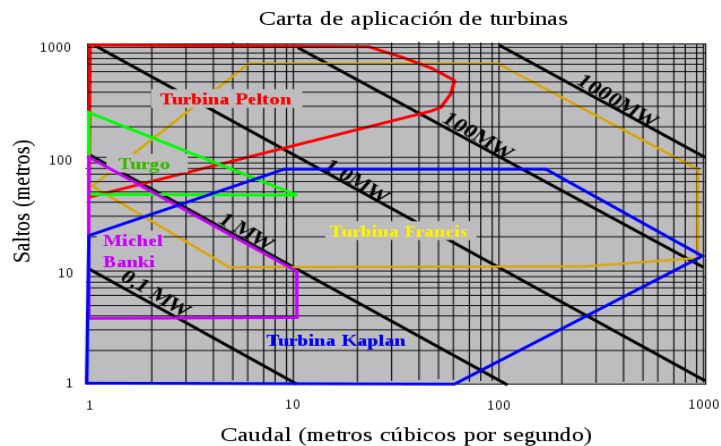
Turbina Pelton: Son turbinas de flujo *transversal*, y de admisión *parcial*. Directamente de la evolución de los antiguos molinos de agua, y en vez de contar con álabes o palas se dice que tiene *cucharas*. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua muy grandes, pero con caudales pequeños.(Turbina de acción).

Estas fueron las primeras turbinas que se utilizaron, sin embargo el desarrollo y el empleo de estas turbinas no empieza hasta la mitad del siglo XIX, primero se empleó la denominada rueda tangencial introducida por el ingeniero suizo Zuppinger en 1846, que bajo las formas modificadas de hoy se conoce como rueda Pelton, es importante anotar que son muy eficientes, el rendimiento de las ruedas tangenciales ha llegado hasta 95%.

En la turbina Pelton, el agua tiene una presión muy alta. La válvula de aguja, que se usa para controlar el flujo de agua, deja pasar un chorro de agua que choca con los álabes de la turbina transfiriéndole su energía y haciendo girar la turbina. Esta, a su vez, hace girar un generador que está acoplado al eje de la turbina para producir energía eléctrica, como medida de seguridad se usa una válvula esférica.

Turbina Francis: Son turbinas de flujo mixto y de reacción. Existen algunos diseños complejos que son capaces de variar el ángulo de sus álabes durante su funcionamiento. Están diseñadas para trabajar con saltos de agua medios y caudal medios.

Carta para seleccionar turbinas hidráulicas (grafica 1) en función del caudal y el salto. Esta clasificación es la más determinista, ya que entre las distintas de cada género las diferencias sólo pueden ser de tamaño, ángulo de los álabes o cangilones, o de otras partes de la turbomáquina distinta al rodete



En esta práctica vamos a estudiar el comportamiento de una turbina Pelton; los diferentes comportamientos con diferentes parámetros de entrada y de salida, para esto tendremos en cuenta lo siguiente:

Potencia neta o primaria (N), es la que hay en la entrada de la turbina.

$$N = \delta Q H \quad (\text{kW})$$

Siendo: δ = densidad del agua (1000 kg/m³)

Q = caudal a la entrada (m³/s)

H = presión de entrada (mca)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

Potencia en el eje o secundaria (Ne), es la que tiene la turbina en el mismo eje y es por lo tanto la que transmite al generador.

$$N_e = M * n * 0.736 / 716 \quad (\text{kW})$$

Siendo: M = el par (Nm)

n = velocidad en rpm (rpm)

Potencia eléctrica o útil (N_u), es la que nos proporciona el generador.

$$N_u = V * I \quad (\text{kW})$$

Siendo: V = la tensión (V)

I = la corriente (A)

Rendimiento total (t), de la turbina

$$t = N_e / N \quad (\%)$$

Rendimiento del generador (d), y disipada por la carga

$$d = N_u / N_e \quad (\%)$$

Rendimiento global (R), que puede ser o el producto de las dos anteriores o la relación entre la potencia útil y la primaria.

$$R = t * d \quad (\%)$$

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para todas las prácticas contaremos con el espacio de trabajo conocido como laboratorio de pequeñas centrales, ubicado en el edificio 353 espacio 1013 de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. En este contaremos con los equipos de control y actuación necesarios para la realización de laboratorios orientados al fortalecimiento de las habilidades teóricas y prácticas en el proceso de la generación hidroeléctrica.

Para esta práctica de contar con los elementos adicionales (turbina pelton), el resto del montaje es igual al que hemos trabajado hasta el momento (bomba trabajando como turbina)

3. PROCEDIMIENTO

1. Antes de iniciar la prueba asegúrese que los elementos que constituyen la planta se encuentren debidamente ajustados para evitar fugas del fluido y un posible daño.

2. Al igual que cualquier máquina de alta velocidad, la turbina debe tratarse y utilizarse con sumo cuidado. Si se producen ruidos o vibración inusual, debe cerrarse inmediatamente el botón de paro de emergencia.
3. Desde el pc servidor corra la estrategia de trabajo que aprendió a manejar en el laboratorio 2, hasta la conexión a la red.
4. Tome los datos que se le solicitan en la tabla #1, teniendo en cuenta que los caudales a trabajar están en el rango de 500 a 1000 litros.
5. Tome datos de trabajo de la turbina necesarios para poder construir la grafica caudal vs velocidad de giro (RPM)

Tabla #1

Datos en turbina	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Q				
H				
N				
M				
V				
I				

6. PUNTOS A DESARROLLAR

1. Investigar cómo se construyen experimentalmente las curvas características de trabajo para una turbina pelton. Con los datos tomados construya al menos 2.
2. Determine la velocidad específica para esta turbina de un solo chorro.
3. Mida el diámetro de la turbina utilizada y calcule este diámetro con la ecuación correspondiente y realice el análisis correspondiente.
4. Con los valores de la tabla # 1 llene la tabla # 2:
5. Construya la grafica caudal vs velocidad de giro. Realice un análisis de esta.

Tabla # 2

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
N				
Ne				
Un				
% Turbina				
Generador				
% Global				

BIBLIOGRAFÍA

Shortridge R., "Lester Pelton and His Water Weel", pp 22-26, Hydro Review, October 1989.

C. Mattaix, "TURBOMAQUINAS \ HIDRAULICAS"; Ed. ICAI; Madrid, 1975.

Reyes Aguirre M., "Curso de Máquinas Hidráulicas", Facultad de Ingeniería U.N.A.M., (Mexico, 1965).

LABORATORIO

Rechazo de carga en una central hidroeléctrica.

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

En el caso de una central hidroeléctrica cuando se produce una caída parcial o total de la demanda, además de la variación de presión interesa la variación de velocidad del grupo turbina y generador, especialmente cuando ocurre un rechazo total de carga. Un rechazo total de carga significa abrir el interruptor principal del generador, lo que separa el generador de la red, por lo que la potencia mecánica de la turbina resulta en un aumento de velocidad de la unidad. El regulador de velocidad en este caso debe cerrar el distribuidor controlando el aumento de velocidad en el nivel garantizado y de ajuste de protecciones, pero la velocidad de cierre debe estar limitada para evitar que el aumento de presión supere también el nivel garantizado.

De igual manera en un rechazo de carga es la chimenea de equilibrio quien hace la función de amortiguador, evitando que se produzcan sobre presiones en las tuberías de la instalación. Es así como la columna de agua debe aumentar; la altura de la chimenea debe ser diseñada para el peor de los casos, que sería cuando exista un bloqueo o parada instantánea de la máquina por algún fallo cuando esté entregando su máxima potencia.

Es interesante comentar lo siguiente, cuando una turbina pierde carga esta tiende a embalsarse, por lo que habría que cerrar de manera rápida la válvula mariposa, pero se debe tener en cuenta que mientras más rápido se la cierre, mayor será el golpe de ariete producido en las tuberías lo que puede causar daños.

Por lo tanto cuando halla una falla que produzca que la velocidad de la máquina aumente, habría que estudiar el tiempo máximo que la turbina puede acelerarse antes de que se embale, para darle así un mayor tiempo de giro antes del cierre total de la válvula mariposa causando entonces un menor golpe de ariete en las tuberías.

En otras palabras habría que analizar el tiempo de cierre de la válvula mariposa vs. el embalamiento de la turbina y el golpe de ariete máximo y mínimo en las tuberías.

En síntesis, es necesario optimizar el transitorio hidromecánico ya que las pruebas de rechazo de carga son efectuadas entre otras para verificar la rigidez mecánica y balanceo de la máquina, durante las pruebas de puesta en servicio de nuevas unidades o reconstruidas. Esta garantiza un margen de seguridad ante la eventualidad de una repentina actuación de la protección. Esta prueba revela la rigidez del rotor y estator, el alineamiento del eje, y el comportamiento vibracional de la máquina.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para todas las prácticas se cuenta con la interfaz vía Internet que controla el laboratorio de pequeñas centrales, ubicado en el edificio 353 espacio 1013 de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. En este contaremos con los equipos de control y actuación necesarios para la realización de laboratorios orientados al fortalecimiento de

las habilidades teóricas y prácticas en el proceso de la generación hidroeléctrica. Se debe mencionar que en esta práctica se puede hacer uso de la turbina pelton, o de la bomba en función de turbina (Butus).

PROCEDIMIENTO

- Arrancar la central hidroeléctrica en operación automática
- Esperar 5 minutos
- Aplicar 25 % de la carga.
- Abrir el interruptor principal y realizar las mediciones de retiro brusco de Carga
- Repetir el procedimiento los puntos anteriores para cargas de 50, 75 y 100 %.
- Contar 30 segundos desde la desconexión del interruptor principal y luego esperar que la válvula cierre por protección.

PUNTOS A DESARROLLAR

- Con los datos tomados se deben construir las curvas de velocidad de la turbina, presión de entrada en la turbina Vs tiempo, potencia eléctrica y potencia mecánica en el eje de la turbina.
- Realice su respectivo análisis de cada una de las curvas construidas.

bibliografía

IEEE Std. 421.5-1992. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

LABORATORIO

Característica de la turbina (bomba como turbina)

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

Las turbinas, representan hidráulicamente una pérdida de energía mecánica del flujo, pero la energía extraída se utiliza para mover una hélice. El torque que genera el movimiento se utiliza para la generación de energía eléctrica. Existen varios tipos de turbinas, entre ellos se destacan las tipo Francis y Pelton; la diferencia entre cada una de éstas se debe a la forma de la hélice y la forma en que el fluido interactúa con ellas.

La expresión que relaciona la potencia producida con la energía que se extrae del flujo y el caudal que circula por el sistema es:

$$P = \eta * \gamma * Q * H_n$$

dónde:

- P, es la potencia generada.
- η , es el rendimiento de la turbina (con un valor entre 0 y 1).
- γ , es el peso específico del fluido.
- Q, es el caudal.
- H_n , es el salto neto.

Para llegar a conocer bien las particularidades del funcionamiento de un determinado tipo de turbina, es necesario realizar con ella un gran número de ensayos, que abarquen la totalidad de las condiciones posibles de trabajo, que vienen determinadas por la variabilidad del salto, de la carga (par resistente), de la velocidad, etc.

Para cada valor del grado de admisión x , que se obtiene variando la posición de las directrices móviles del distribuidor en las turbinas de reacción, o la carrera de la aguja del inyector en las ruedas Pelton, se realizan, (con ayuda de un freno y a diferentes velocidades), una serie de medidas procurando mantener constante el valor del salto neto. La potencia absorbida (potencia hidráulica) se calcula conocidos el caudal Q y el salto neto H_n . También se puede determinar el valor del número específico n_s ,

Curvas de rendimientos para H_n y n constantes, en función del caudal y la potencia.

La forma habitual de funcionamiento de las turbinas es suministrar, en cada instante, la potencia que exige el alternador, manteniendo al mismo tiempo constante la frecuencia y, por lo tanto, el número de revoluciones. Este es el motivo de que sea interesante estudiar las variaciones del rendimiento al variar la potencia o el caudal, manteniendo constantes el salto H_n y la velocidad n .

la curva de rendimientos en función de los caudales se obtiene para cada valor de n_s manteniendo constantes en los ensayos los valores de H_n y n , midiendo al freno la potencia útil y calculando el rendimiento por la expresión:

$$\eta = \frac{N}{\rho Q H_t}$$

en la que Q se hace variar modificando la admisión x.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para todas las prácticas se cuenta con la interfaz vía Internet que controla el laboratorio de pequeñas centrales, ubicado en el edificio 353 espacio 1013 de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. En este contaremos con una bomba en función de turbina (Butus) o de una turbina pelton.

PROCEDIMIENTO

- Antes de iniciar la prueba el monitor o profesor se debe de asegurar que los elementos que constituyen la planta se encuentren debidamente ajustados para evitar fugas del fluido y un posible daño.
- Realice todos los pasos necesarios para llevar la central hasta la conexión a la red.
- Se trata de determinar las características de la turbina a velocidad constante, para posiciones diferentes del valor de la potencia generada (entre 300 W y 1500 W).
- En la ventana de operación, se debe introducir el valor solicitado de potencia.
- Para cada posición de apertura y carga, verificando las RPM asignadas, se toman lecturas estabilizadas de la corriente y el voltaje del generador, la presión de entrada del agua de la turbina y el torque en el eje de la turbina.

PUNTOS A DESARROLLAR

- Con los datos tomados se deben construir las tablas de las características experimentales de operación de la turbina ensayada
- Realice su respectivo análisis, comparación y observaciones sobre los resultados obtenidos.
- Cálculo de la velocidad específica de la turbina (únicamente) en la condición de máxima eficiencia de la turbina.

P (W)	Generador		Turbina		Sistema	
	E(V)	I(A)	RPM	Torque	Presión Entrada	Caudal

bibliografía

- Claudio Mataix, “Mecánica de Fluidos y, Máquinas Hidráulicas, Edit. Harla.
- V. Streeter, Mecánica de Fluidos, Edit. Mc Graw-Hill.