

Sistema Automático de Control para la Operación Remota de un Prototipo de Generación de Energía Hidroeléctrica

Ramiro Ortiz^{1*} Álvaro Bernal^{1**} Félix Correa¹ Alejandro García¹
Fabio González¹ Federman Tapia¹

(1) Universidad del Valle

*pamupo@univalle.edu.co

**alvaro@univalle.edu.co

Recibido 03 de Mayo de 2010. Aceptado 15 de Enero de 2011

Received: May 03, 2010 Accepted: January 15, 2011

RESUMEN

En este artículo se presenta una descripción detallada del sistema de generación de energía hidroeléctrica de la Universidad del Valle, donde se identifican cada uno de los subsistemas, se definen las variables pertenecientes a éstos, las etapas de funcionamiento y por último se muestra el desarrollo de toda la instrumentación utilizada y la automatización empleada para poder operar este sistema de forma remota vía Web.

Palabras clave: Sistema de generación de energía hidroeléctrica, instrumentación, equipo de control, automatización, estrategia de control, diagramas de flujo, interfaz HMI, modos de operación.

Automatic Control for the Remote Operation of a Prototype Hydropower Generation System

ABSTRACT

The present article describes the design and implementation of RACK and describes an example of an autonomous mobile robot based on this framework. This paper presents a brief description of the prototype hydroelectric generation system located at the University of Valle. The goal of the work is oriented to automatize each one of the stages involved in its operation. The selection of the variables, instruments and control equipment required for the automation of the system regarding remote operation is also presented.

Keywords: Hydropower generation system, instrumentation, equipment control, automation, strategy control, flowcharts, HMI interface, modes of operation.

1. INTRODUCCIÓN

La escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle cuenta con un Prototipo de Sistema de Generación de Energía Hidroeléctrica (SGEH) a pequeña escala y modular, el cual es una herramienta importante para la validación de estudios realizados por los grupos de investigación en el campo de la generación hidroeléctrica.

Sin embargo el sistema SGEH opera de forma completamente manual, por tal motivo se implementó un sistema automático de control para el SGEH con el objetivo de facilitar los procesos de experimentación e investigación en sistemas de generación hidroeléctrica, dotando a la Universidad con una plataforma de experimentación totalmente automatizada utilizando nuevas tecnologías.

En este documento se presenta la descripción y funcionamiento del SGEH, así como la automatización del sistema en los procesos de arranque, conexión, operación y desconexión con el fin de ofrecer una plataforma experimental que facilite su operación de forma remota a través de Internet.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

El SGEH de la Universidad del Valle es un sistema compuesto por diferentes equipos electromecánicos e hidráulicos tales como motores, bombas y turbinas hidráulicas, además de contar con equipos industriales de medición y actuación que permiten medir y controlar variables del proceso tales como nivel, presión, caudal, velocidad, potencia activa utilizando señales de corriente 4-20 mA, voltaje -10/+10 VDC o protocolos de comunicación digital Hart o Modbus entre otros.

La Fig. 1 muestra el diagrama del SGEH. El agua, que es almacenada en el tanque principal TK-1 con una capacidad de 2000 litros, desde donde es impulsada por una bomba centrífuga de alta eficiencia de 1100 Lts/min, es movida por un motor trifásico de 25 H.P. Ésta es llevada a través de una tubería de presión de 3 pulgadas de diámetro hasta uno de los equipos hidráulicos del laboratorio como puede ser una turbina Pelton o una bomba que opera como turbina. Como equipo de generación se tiene un motor asíncrono de 4 polos operando en régimen de generación acoplado a la turbina por medio de

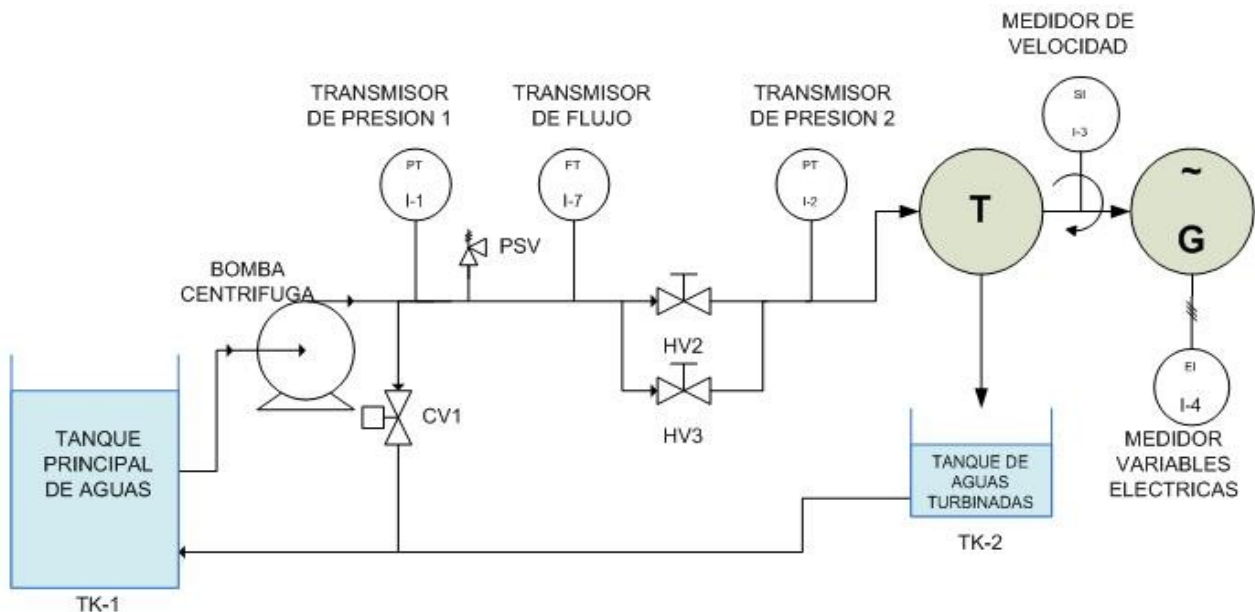


Fig. 1. Diagrama del sistema de generación de energía hidroeléctrica.

poleas y una correa de transmisión. El flujo de agua hacia a la turbina puede ser variado por medio de la válvula de control CV1 instalada sobre una tubería de derivación de 2 pulgadas de diámetro. El posicionamiento de la válvula de control se realiza a través de una señal de corriente 4–20 mA, permitiendo regular la velocidad a la que gira el grupo turbina-generator antes de realizarse la conexión a la red y regular la potencia generada después de realizarse la conexión a la red eléctrica.

El agua utilizada para mover el grupo turbina-generator se deposita en el tanque para aguas turbinadas TK-2 y va de regreso al tanque principal TK-1 por medio de una tubería de retorno de 12 pulgadas de diámetro conformando así un circuito cerrado del agua utilizada durante el proceso.

Adicionalmente sobre la tubería de presión se encuentra instalada una válvula de alivio PSV ajustada para abrirse al detectar una presión superior a 70 PSI enviando el caudal de sobrepresión a la tubería de retorno y luego hacia el tanque principal TK-1. La válvula principal HV2 con su respectivo By-Pass (Válvula HV3) son válvulas manuales y por conveniencia se dejan completamente abiertas durante el funcionamiento del sistema.

3. OPERACIÓN DE LA PLANTA SGHE.

En general el sistema de control en una planta de energía hidroeléctrica provee una forma de seleccionar el modo de operación y un medio de arrancar y detener todo el sistema. La intervención del operario puede solo limitarse a oprimir un solo botón en un modo de operación totalmente automático o se puede requerir un alto grado de intervención del operario en una operación totalmente manual. Cualquiera que sea el grado de intervención del operario en el sistema el funcionamiento puede ser dividido en 4 etapas [1] como son: chequeo de condiciones de arranque, inicio de sistemas auxiliares, arranque de la unidad y conexión y finalmente la parada de la unidad.

Dadas las características del laboratorio y los equipos que lo conforman algunas de las etapas

definidas en el STD IEEE 1010 [1] no pueden ser realizadas en el SGEH. En este caso se han identificado las siguientes etapas en el funcionamiento del sistema SGEH.

Chequeo de condiciones de arranque. En el chequeo de las condiciones iniciales se verifica el estado de determinados elementos y el estado de algunas señales del proceso como por ejemplo la posición de la válvula CV1 y el nivel de agua en el tanque TK-1. La Tabla 1 contiene el grupo de condiciones iniciales para el arranque del sistema.

Tabla 1. Condiciones iniciales de arranque del SGEH.

Condiciones de arranque	Módulo
Nivel del Tanque Principal	Nivel Máximo
Válvula de Control CV1	Abierta completamente
Válvula esférica HV2	Abierta completamente
Motor 25 H.P.	Desconectado
Generador	Desconectado
Tensión de Fases	Valores Nominales
Estado Instrumentos de medición	Operación normal
Velocidad Grupo Turbina-Generador	Detenido (0 RPM)
Presión Bomba	Normal (0 PSI)
Presión Turbina	Normal (0 PSI)

Arranque y conexión. Una vez que todas las condiciones iniciales se han cumplido se procede al encendido de la motobomba centrífuga de alta eficiencia, la cual simula la energía potencial del agua con una capacidad de bombeo de hasta 1100 litros por minuto después de transcurrido el tiempo

de cebado. Seguidamente, por medio de la válvula de control CV1 se regula la velocidad del grupo turbina-generator, hasta llevarlo a un valor menor a la velocidad sincrónica (1800 rpm) y se realiza entonces la conexión como motor a la red eléctrica cumpliéndose que:

En la conexión del SGEH a la red se debe tener en cuenta la protección de los elementos de medición especialmente del medidor de corriente para evitar daños en éste, por el pico de corriente que se presenta cuando el motor de inducción se conecta al sistema eléctrico.

Operación. Con el sistema conectado a la red como motor se aumenta la velocidad de la turbina por medio de la válvula CV1 de tal forma que la velocidad mecánica del motor de inducción sea mayor que la velocidad sincrónica. Manteniendo la velocidad mecánica por encima de la velocidad sincrónica se realizan ajustes en la válvula de control CV1 para alcanzar la potencia deseada y se verifican constantemente parámetros eléctricos tales como la tensión, corriente, frecuencia y potencia.

Desconexión. El sistema realiza el proceso inverso a la etapa de arranque, para esto inicialmente se abre gradualmente la válvula CV1 disminuyendo de esta forma la velocidad del grupo turbina-generator hasta que el generador asíncrono se encuentre en régimen de motor, luego se abren los contactores del generador y finalmente se abre el contactor de la motobomba llevando todo el sistema a sus condiciones iniciales.

4. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA SGEH.

Se ha visto en un principio la operación de la planta donde se observa que cada acción realizada en las diferentes fases de funcionamiento involucra inicialmente como elemento activo uno o más operarios en una operación completamente manual. Con el propósito de ofrecer una plataforma experimental que sirva como apoyo en los procesos de aprendizaje e investigación en el campo de la generación hidroeléctrica, se implementó la total automatización del sistema SGEH en todas su fases

de operación dotando a la planta de todos los elementos de medición y control apropiados para dicho propósito, además de contar con una interfaz hardware/software que permite la operación del sistema de forma remota a través de Internet.

La implementación de una nueva estructura de control basada en controladores programables y elementos de medición inteligentes facilita el desarrollo de las funciones básicas de control en sistemas de generación hidroeléctrica como lo son: la recolección de información de los procesos, el control del proceso y el monitoreo de la información del proceso y la presentación de la información del proceso.

4.1 . Instrumentación asociada al SGEH

Dentro del SGEH de la Universidad del Valle la recolección de la información del proceso involucra un conjunto de variables las cuales se han clasificado en mecánicas, hidráulicas y eléctricas [3].

Tabla 2. Variables del SGEH.

Variables	Mecánicas	Velocidad Grupo Turbina-Generador
	Hidráulicas	Nivel Caudal Presión en la tubería
	Eléctricas	Potencia Activa Potencia Reactiva Potencia Aparente Voltajes de línea Corrientes de fase Factor de potencia Frecuencia eléctrica

La recolección de la información de los procesos se lleva a cabo por medio de equipos de medición como transmisores inteligentes que garantizan una medida confiable de las diferentes variables del proceso, las cuales se detallan a continuación.

Para el monitoreo de los niveles del tanque se emplean sensores digitales que utilizan como elemento primario de medición interruptores magnéticos del tipo “reed switch” y usan flotadores para la detección de los niveles mínimos y máximos.

Para el monitoreo de la presión tanto antes de la válvula de alivio como a la entrada de la turbina se usan transmisores de presión SMAR LD291 [3] los cuales utilizan sensores capacitivos y el transmisor de tipo electrónico entrega una salida de 4-20mA con posibilidades de comunicación mediante el protocolo HART.

El caudal es la variable controlada en el proceso y sus variaciones influyen de manera inmediata en la potencia de salida del sistema. Para la medición del caudal se tiene el equipo DFM 5.0 de *GreyLine* [3] el cual es un medidor no invasivo de tipo ultrasónico basado en el efecto doppler, el transmisor es de tipo electrónico con salida de 4-20 mA.

Finalmente cuenta con un medidor Lovato DMK 22 [3] el cual está en la capacidad de medir en conjunto todo el grupo de variables eléctricas en un sistema trifásico. La salida del dispositivo es serial con una interfaz RS-485 y utiliza el protocolo Modbus para el envío de la información obtenida en el sistema.

Tener un registro de la velocidad permite determinar el momento en el que el sistema debe ser conectado a la red eléctrica. La velocidad es medida con un tacómetro RE0444R de la marca Radio Energie [3] el cual consiste en un generador eléctrico el cual proporciona un voltaje de DC proporcional a la velocidad del grupo turbina generador.

Además de los sensores de medición se necesita un actuador cuya función es regular el paso de caudal

dependiendo de las necesidades del sistema. El elemento actuador es la válvula eléctrica TRIAC EMI-300 [3], esta utiliza alimentación de 220 VAC, señales de control y realimentación de 4-20mA

Esta válvula proporcional tiene una relación inversa con la velocidad del sistema turbina-generador, donde a mayor apertura de la válvula se disminuye el caudal hacia el sistema, mientras que al cerrar la válvula, la mayor cantidad de agua fluirá hacia la turbina y por tanto aumentará la velocidad del sistema.

4.2 . Equipo de control en el SGEH

El equipo encargado de realizar el procesamiento de la información entregada por los diferentes elementos de medición y llevar a cabo el control del proceso es un controlador para la automatización programable (PAC) de la serie SNAP PAC R .

El SNAP PAC R1 además de contar con todas las funcionalidades de un PLC convencional resulta ser una herramienta flexible ya que está basado en estándares abiertos con soporte a una gran variedad de protocolos basados en TCP/IP [4] facilitando el intercambio de información del proceso con otros sistemas en la red de computo mediante el manejo de bases de datos como MySQL, Microsoft Access y Server SQL utilizando herramientas de software incluidas en el paquete de programación PAC Project Profesional, posibilitando el acceso a la información del controlador desde una aplicación WEB para la operación remota del sistema a través de Internet.

La utilización del controlador SNAP PAC R1 proporciona un manejo del sistema de forma local y remota adoptando una arquitectura [5] como la mostrada en la Fig. 2. En el nivel inferior de la figura se muestra el laboratorio SGEH junto con los diferentes instrumentos de medición y actuadores, luego se presenta el equipo controlador donde se lleva a cabo la estrategia de control para la puesta en marcha del SGEH de forma automática, semi-automática o manual [5].

A su vez es el encargado de adquirir y enviar información al proceso a través de sus módulos I/O empleando señales de corriente 4-20mA, voltaje y enlaces de comunicación serial RS232 y RS485.

Para el monitoreo, supervisión y operación de la información proceso se dispone de una estación central o PC con una interfaz hombre máquina (HMI) desde la cual se ejecuten todas las funcionalidades del sistema SGEH [5], además de llevar un registro de las variables medidas en el proceso y una presentación adecuada de la información a través de gráficas de tendencia.

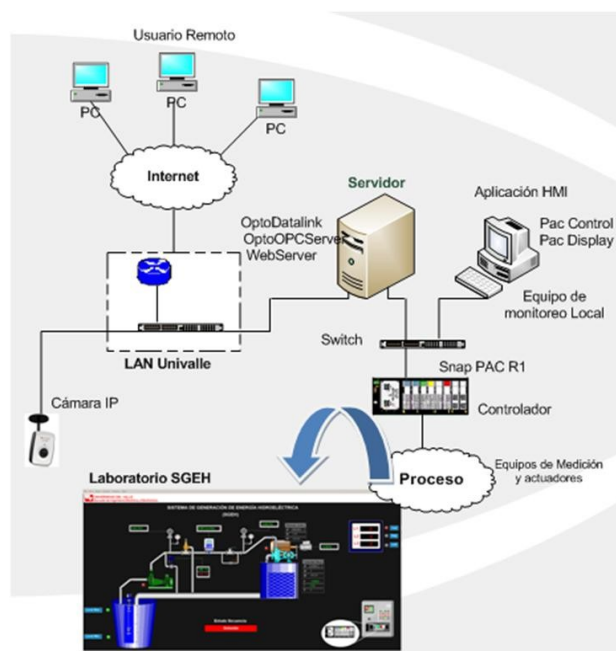


Fig. 2. Esquema de interconexión y comunicación de equipos para la operación remota.

Información de la operación remota del SGEH vía WEB puede ser revisado en [6].

4.3 . Estrategia de control en el SNAP PAC R1

La estrategia de control es el programa que se ejecuta en el controlador SNAP PAC R1 el cual permite realizar la operación del sistema SGEH en los tres modos mencionados. La programación del dispositivo se realiza mediante diagramas de flujo los cuales pueden controlar o realizar diferentes tareas ejecutándose de forma simultánea.

La estrategia de control para la planta SGEH [5] se encuentra dividida en tres bloques que agrupan los diferentes diagramas de funcionamiento de la estrategia como se muestra en la Fig. 3. Estos bloques son: diagramas de configuración, diagramas de acceso a la información y diagramas de la secuencia de control.



Fig. 3. Diagrama de la estrategia de control.

Los diagramas de configuración se utilizan para inicializar los parámetros para establecer comunicación con el Multímetro Lovato DMK22 y la pantalla Táctil Panasonic GT32, los cuales utilizan comunicación serial por enlaces RS485 y RS232 respectivamente.

Por medio de los diagramas de acceso a la información se realiza la lectura y escritura de las diferentes variables análogas y digitales del sistema.

Los diagramas de operación están relacionados con las secuencias de control de la planta durante los modos de operación semiautomático y automático, ver Fig. 4.

En el modo de operación automático todo el proceso desde la secuencia de arranque hasta la secuencia de parada es realizado respondiendo a una sola orden dada por el operario, mientras que en el modo de operación semiautomático el programa hace pausas en diferentes etapas del proceso esperando por parte del operador la orden de avanzar a la siguiente etapa. La operación semiautomática guía al operador por cada uno de las etapas del proceso de una forma segura, ya que

evita que el operador realice una acción inapropiada la cual pueda ocasionar daños al sistema y permite que durante el proceso se pueda pasar del modo semiautomático al modo automático y viceversa.

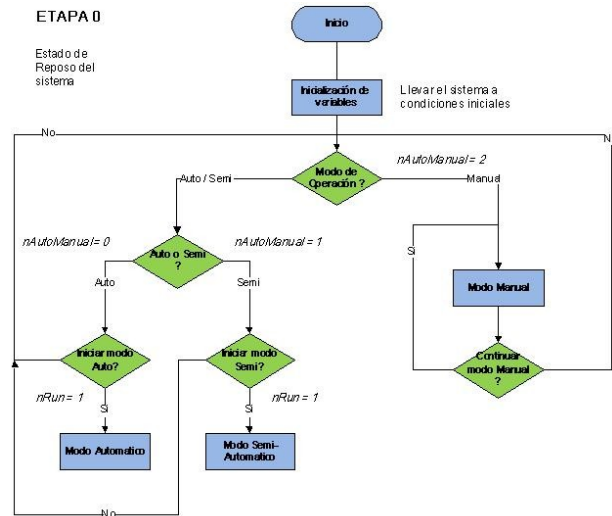


Fig. 4. Diagrama para la selección del modo de operación.

Finalmente está el modo de operación manual en el cual el operario tiene la capacidad de acceder directamente y por separado a cada uno de los elementos del sistema. Este modo de operación es utilizado solo a nivel interno por personal con un amplio conocimiento del funcionamiento de la planta y tiene como propósito realizar pruebas de

laboratorio aisladas que no necesariamente están sujetas a los procedimientos para la puesta en marcha del sistema tal como se manejan en el modo de operación automático y semiautomático.

4.4. Interfaz del operador usando PAC display

Haciendo uso de la herramienta de software PAC Display [4] se diseñó una interfaz de usuario HMI que permite monitorear, supervisar y operar el SGEH [5] de forma local desde un computador para los tres modos de operación con los que cuenta el sistema: automático, semiautomático y manual. La interfaz permite el control de las secuencias de arranque, conexión, operación y desconexión de la planta, además de realizar el monitoreo de las variables del proceso. La interfaz se encuentra dividida en 5 paneles para la presentación de la información: Principal, Control de secuencias, Medidas, Tendencias y Alarmas.

También se dispone de un Panel de Mando que permite seleccionar cada uno de los modos de operación del sistema descritos anteriormente

En la Fig. 5 se muestra el panel principal de la interfaz HMI.



Fig. 5. Panel principal de la interfaz de operador.

5. AGRADECIMIENTOS

El proyecto se desarrolló gracias a la financiación de la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Valle mediante el contrato CI 2243.

6. CONCLUSIONES.

Se cuenta con un sistema automático de control para la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica basada en procedimientos y protocolos definidos en estándares de la IEEE como el STD 1010.

Las características inherentes al SNAP PAC R1 utilizado en la implementación de un sistema automático de control para el SGEH brindan amplias posibilidades de comunicación permitiéndole interactuar con otros sistemas de la red de computadores mediante el intercambio de información del proceso en bases de datos como MySQL facilitando el acceso al sistema por vía web.

La centralización del control y la supervisión de la operación de la planta desde una estación local (PC) minimiza la intervención de los usuarios en los procedimientos para la puesta en marcha del sistema y lo deja a punto para la implementación de una operación remota.

La modularidad del SGEH hace que puedan integrarse a él diferentes máquinas rotativas como formas de experimentación y estudio en el campo de la conversión de la energía.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos: IEEE. *Guide for control of Hydroelectric Power Plants*, STD 1010. New York: IEEE. 2006.

[2] Ortiz F, Ramiro. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Mc Graw Hill Interamericana. Colombia.2001.

[3] F. Tapia, F. González, *Análisis y especificación de la instrumentación para implementar la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica*. Tesis de pregrado. Universidad del Valle, Cali-Valle, 2009.

[4] SNAP PAC R-SERIES CONTROLLER USER'S GUIDE [En línea]. Estados Unidos: OPTO 22, 2008. Disponible en Internet <http://www.opto22.com/>

[5] F. Correa, A. García, *Diseño de un sistema automático de control para la operación remota de un sistema de generación de energía hidroeléctrica*, Tesis de pregrado. Universidad del Valle, Cali-Valle, 2010.

[6] C. Cardozo, W. El Helou, A. Bernal, R. Ortiz. *Interfaz gráfica para la operación remota de un prototipo de generación de energía hidroeléctrica*, Revista El Hombre y la Máquina , Universidad Autónoma de Occidente, ISSN 0121-0777, No. 33,, Año XXI, Págs. 110-117. Jul.-Dic., 2009.