

AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS EN LA CENTRAL CHIVOR PARA MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES CRÍTICAS

Luis Eduardo Niño ^{*†}, Mauricio Méndez, Claudia Sánchez ^{**}, Hermann Fuquen ^{**}

**AES CHIVOR, Bogotá, Colombia.*

*** COLINNOVACION SAS, Bogotá, Colombia.*

Recibido 16 Febrero 2015; aceptado 15 Diciembre 2015
Disponible en línea: 19 Diciembre 2016

Resumen: Este artículo presenta los resultados del proyecto de desarrollo tecnológico realizado por AES Chivor & CIA SCA ESP en la Central Hidroeléctrica de Chivor y en pequeña central de Tunjita como parte del modelo de automatización de las plantas. Se realiza una revisión al estado del arte de distintas tecnologías para el control de variables críticas en la operación las centrales de generación de energía eléctrica. Se ilustran los métodos finalmente implementados en la planta de generación de Chivor y los resultados de la aplicación de distintos sistemas de automatización.

Palabras clave: Hidroeléctrica, Generación, Gobernadores de Velocidad, Medidores, Turbinas.

PROCESS AUTOMATION IN THE CENTRAL CHIVOR FOR MONITORING AND CONTROL OF CRITICAL VARIABLES

Abstract: This paper presents the results of a technology development project conducted by AES Chivor in the reservoir of La Esmeralda and the Small Hydroelectric Plant Tunjita as part of the automation model implemented in the generation plant of Chivor. A review of the state of the art of different technologies for the control of critical variables in the operation of generation plants is described. Finally, the implemented methods executed in Chivor's generation plant and the results of the application of different automation systems are illustrated.

Keywords: Hydroelectric Generation, Speed Governors, Meters, Turbine, Automation.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento en la demanda mundial de energía, como consecuencia del desarrollo económico en distintos países y la necesidad de controlar la emisión de material contaminante a la atmosfera por el uso creciente de combustibles fósiles como el carbón usado para la generación de energía eléctrica, la instalación de centrales hidroeléctricas de pequeño y gran tamaño se ha

convertido en una importante alternativa que aprovecha los recursos naturales en países donde se tiene acceso a ríos y canales que alimenten estos sistemas. Sin embargo, la instalación de este tipo de centrales requiere adicionalmente de control y automatización, siendo esta una actividad determinante para realizar una correcta coordinación entre unidades generadoras y optimizar la operación de cada una de ellas.

† Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+571) 6725048 - 5261088

E-mail: luis.nino@aes.com (Luis Niño)

La instrumentación de variables eléctricas asociadas a la generación tales como: voltaje, corriente y la potencia generada, así como algunas magnitudes no eléctricas, entre ellas: cabeza y cantidad de agua de embalse, flujo de agua en la descarga, presión, temperatura, velocidad rotacional de turbina entre otros, son variables supervisadas y controladas mediante esta instrumentación, la cual idealmente deben ser integrada para su optimización ([Jarry-Bolduc & Cote, 2014](#)).

Para la operación confiable y segura de un embalse para generación de energía hidroeléctrica requiere del diseño e implementación de un sistema de medición del nivel de agua almacenada y la medición en tiempo real de las variables hídricas de los ríos aportantes. Con base en estudios estadísticos de dichos niveles, es posible calcular en tiempo real las reservas de agua disponibles, información de vital importancia para el normal y óptimo desarrollo del proceso de generación. De la continuidad, fiabilidad y precisión de esta información, depende la operación eficiente del embalse. Esta información sirve también como sistema de alerta que permite anticiparse ante situaciones críticas o cambios inesperados en los niveles, que puedan afectar la operación.

Actualmente se dispone de equipos y soluciones de última tecnología que permiten entre otras aplicaciones la toma de datos en tiempo real de niveles de embalses, cada uno atendiendo necesidades generales de los tipos de embalse. La información que proveen estos equipos de medición puede abarcar distintos parámetros críticos, como volumen de embalses, nivel, caudal de los ríos afluentes y la tendencia de sus corrientes (crecientes). Al tener supervisados estos parámetros críticos, los sistemas pueden ser parametrizados para proveer alarmas tempranas que permiten la toma de decisiones oportunas. Adicionalmente, es posible alimentar bases de datos que permitan disponer de información histórica de estas variables supervisadas. Dicha información es de vital importancia ya que son la base para estudios más avanzados del comportamiento del embalse a través del tiempo. Los equipos dedicados a la toma de estos datos requieren ser seleccionados, instalados y parametrizados de acuerdo al contexto y a las necesidades propias de la infraestructura.

Por otra parte, aunque la generación hidroeléctrica tiene un amplio desarrollo y es una tecnología dominada, de acuerdo con [Sierra et al \(2011\)](#) en el caso de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) los mayores retos y avances a nivel tecnológico son tanto la automatización como el control de sus procesos ([Sierra, et al., 2011](#)).

A continuación, se hará un resumen de los tipos de tecnologías y métodos para medir el nivel de los embalses, los cuales pueden ser modificados y mejorados de acuerdo con las necesidades de sus usuarios.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1. Tecnologías aplicadas en los equipos de medida por tiempo de paso.

- *Por Ultrasonido:* En este caso, se usa una sonda ultrasónica situada sobre el nivel del medio a medir y a una cota superior a la máxima medible se generan una serie de impulsos. El transductor mide el tiempo empleado por los impulsos ultrasónicos en recorrer la distancia entre el sensor y el primer obstáculo encontrado más el tiempo empleado por el eco reflejado para volver al sensor. Este equipo permite una precisión de 0,1% F.S. La magnitud que más afecta los impulsos es la temperatura del aire, por lo cual, los equipos ultrasónicos para este tipo de medidas incorporan siempre un sensor de temperatura para la compensación automática de las medidas ([HidroSanco, 2006](#)).
- *Por Radar:* La base de estos equipos son microondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz sin necesidad de medio transmisor alguno. Una antena emite impulsos de microondas de 1ns de duración. El sistema que integra la recepción y emisión de microondas integra los impulsos reflectados en la superficie cuyo nivel se desea medir. El nivel se determina a partir de la medición exacta del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción. No se ve afectado por las variaciones de temperatura ya que la velocidad de propagación de las microondas permanece inalterable independiente de medios como niebla, polvo, o en presencia de viento ([HidroSanco, 2006](#)).

2.2. Consideraciones sobre la aplicación de medidas de nivel en embalses

Gracias a los procesos de adaptación y los avances en los estándares de los medidores, se ha avanzado en términos de precisión y prevención de eventos inesperados. Los medidores permiten conocer el nivel de agua en los embalses, así como tomar medidas más complejas como el grado de turbidez del agua, tendencia de las corrientes y datos del lecho del embalse.

2.3. Sistema automático de medida y reporte de calidad de Agua con comunicación GSM

En la investigación desarrollada por [Dequing & Ying et. al. \(2012\)](#) se describe un conjunto de instrumentos para medir automáticamente la calidad del agua en línea, con sistemas de automatización para medir la turbidez del agua. El sistema está integrado por múltiples sensores que realizan pruebas de calidad del agua y un módulo de adquisición de datos que consta de un micro controlador y un módulo que permite el monitoreo y la transmisión de información, entre otros elementos. Adicionalmente, a través del microcontrolador se pueden detectar automáticamente varios parámetros de calidad del agua. El micro controlador obtiene los datos, y luego los procesa y analiza. Posteriormente, los datos son enviados al centro de monitoreo por red GSM en la forma de SMS. Esa actividad podría ser realizada instantáneamente ([Dequing et. al., 2012](#)).

La turbidez del agua es causada por partículas suspendidas, que bloquean una gran cantidad de luz incidente, por lo cual los haces de luz se dispersan, causando también una difusión de la luz incidente. En el caso de esta variable, se emplea un sensor foto-eléctrico para detectar la turbidez. Por otro lado, un sensor de temperatura convierte directamente la señal de temperatura en una señal digital. Otros sensores de calidad del agua transforman las señales químicas detectadas en señales eléctricas, amplificadas por el circuito de acondicionamiento de señal. Los multiplexores seleccionan una señal de vía y la envían a un convertidor a señal digital. El sistema se auto-provee de energía eléctrica a través de paneles solares que dan capacidad a sus baterías permanentemente. Puede operar bajo condiciones climáticas adversas y continuar monitoreando en

tiempo real variables del agua como temperatura, pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y otras guías de calidad de este líquido.

El software asociado al módulo de adquisición de datos y al microcontrolador provee funciones tales como: recolección de datos, registro en el tiempo, comparación con los parámetros estándar que se han guardado, SMS de transmisión y recepción en caso de alertas, entre otras.

Un chip compara los datos leídos con parámetros estándar. Si los datos sobrepasan la gama estándar de los parámetros de calidad del agua, el sistema envía datos al módulo GSM dentro del centro de supervisión y gestión de móvil en forma de SMS. Esta información permite tomar las medidas preventivas o correctivas correspondientes a tiempo por los administradores que realizan el seguimiento de la calidad del agua.

2.4. Diseño y Construcción de un sistema que mide el nivel del agua a través de SMS

En la investigación desarrollada por [Saraswati & Kuantama et. al. \(2012\)](#) se presenta el desarrollo de un dispositivo que permite medir el nivel del agua usando un micro controlador AT89S51 para gestionar el sistema, un sensor ultrasónico para medir el nivel del agua y un modem SIM300C GSM como la parte principal para enviar y recibir SMS. El sistema puede medir el nivel del agua y reportar medidas según requiera y se programe ([Saraswati, et al., 2012](#)).

2.5. Gobernadores de Velocidad para Turbinas de Generadores

Para medir la eficiencia de la turbina y generador, debe ser determinada la energía mecánica en la entrada de la turbina y la potencia eléctrica en la salida del generador. Para lograr mejoras en la eficiencia de la turbina, los sistemas de gobernación de velocidad son determinantes para lograrlo, al igual que los medios para medir el agua (flujo) que entra en la turbina. Varias tecnologías se pueden utilizar, tales como: medición de corrientes asociadas, acústica, termodinámica, y los métodos de presión-tiempo. Cada método requiere una instrumentación particular y tiene sus ventajas y desventajas dependiendo principalmente de la configuración de la planta de energía ([Jarry-Bolduc & Cote, 2014](#)).

En la investigación presentada por [Junjun \(2010\)](#) se explica la evolución de estos sistemas de regulación de velocidad. El autor explica que los gobernadores de velocidad de turbina han experimentado varias etapas de desarrollo, incluyendo los equipos reguladores de velocidad hidráulica, al pasar de controles análogos de velocidad electro-hidráulico a controles digitales.

Los reguladores de velocidad electro-hidráulicos digitales se dividen en dos tipos, el primero de control completamente digital y el segundo, con control análogo para la parte hidráulica, pero con el control de tipo digital. En los últimos años, a pesar de que el nuevo sistema digital de gobernación de la turbina mostró un fuerte potencial de desarrollo, el controlador de la parte hidráulica continuó siendo analógico en la gran mayoría de gobernadores electro-hidráulicos. Debido a la alta precisión y la estructura compleja de los componentes, el sistema de control hidráulico analógico tiene una alta demanda de limpieza del medio de aceite, que hace el sistema inestable incluso con escasa fiabilidad. Por lo tanto, se requiere el estudio de sistemas de gobernación para grandes y medianas operaciones hidroeléctricas, así como diseño de nuevos sistemas ([Junjun, 2010](#)).

El sistema propuesto por [Junjun \(2010\)](#) utiliza los dos sistemas servo electro-hidráulicos que consisten en una válvula accionada por motor paso a paso y el interruptor de la válvula deslizante para reemplazar la parte hidráulica analógica tradicional del gobernador electro-hidráulico. La investigación concluye con los procesos de digitalización de los módulos de control servo electro-hidráulico, detallando los principios de trabajo del sistema propuesto, parámetros y definición del modelo matemático del sistema servo electro-hidráulico ([Junjun, 2010](#)). Según los autores, el sistema servo tiene una estructura racional y buenas características dinámicas. Con su estructura, se puede utilizar en situaciones de alto flujo y alta presión.

Otra investigación identificada sobre este tema, realiza una simulación computacional, que permite probar el código controlador del sistema de regulación de velocidad, para corroborar que esta acción se puede ejecutar en tiempo real. Esta simulación es más que necesaria ya que el controlador y el actuador hidráulico se integran para la buena operación de generación. Para que

las pruebas de los controladores en tiempo real sean eficientes para los reguladores de velocidad, en esta simulación se utilizó como base una planta hidroeléctrica con turbinas Francis usando Matlab/Simulink. El modelo se traduce a código C usando Matlab Real-Time Workshop y se corre, en un PLC industrial.

A través de la interfaz de E/S de la central hidroeléctrica virtual y regulador de velocidad (actuador junto con el controlador) se combinan como un sistema de control de lazo cerrado. Se diseña el software para un fácil cambio de parámetros y el seguimiento de todo el proceso se lleva a cabo a través del programa PC que está en comunicación en tiempo real con el sistema de simulación de objetos (OPC - Object Linking and Embedding). Con este banco de pruebas, el controlador puede ser probado de dos maneras: junto con el actuador hidráulico real o en un modelo físico a escala del mismo, si el actuador hidráulico real no está disponible. De esta manera los investigadores plantean un método para examinar y ajustar el rendimiento del gobernador antes de instalarlo a la central eléctrica. Mediante el uso de este sistema de prueba, la eficiencia y la seguridad del gobernador de velocidad se pueden mejorar sustancialmente ([Zaev, et al., 2012](#)).

En la misma línea de las investigaciones [Singh & Naresh et. al. \(2013\)](#) plantean el uso de algoritmos genéticos para el ajuste óptimo de los sistemas de gobernación a fin de obtener una mejor respuesta a la frecuencia y variación de la carga.

[Zhang & Zhang \(2006\)](#) presenta una estrategia de control con mecanismos difusos adaptativos para gobernar una turbina hidráulica. Teniendo en cuenta la complejidad dinámica de estos sistemas y la incertidumbre del modelo de gobernador de turbina hidráulica, así como el rendimiento estático y dinámico del sistema de gobierno como el objetivo final, el controlador que se presenta por los autores combina la teoría clásica de control PID con la teoría de control difuso adaptativo ([Zhang & Zhang, 2006](#)).

El presente documento pretende dar a conocer los resultados del proyecto de desarrollo tecnológico que muestra el plan de automatización en la central de generación de AES CHIVOR, que permite el monitoreo de variables críticas del recurso hídrico y del proceso de control de la generación de

energía, contribuyendo a una mejor toma de decisiones basado en información en tiempo real.

3. ESTUDIO DE CASOS

3.1 La generación hidroeléctrica en China

A nivel mundial son varios los casos de desarrollo y control de centrales hidroeléctricas. El líder mundial en la implementación y operación de centrales hidroeléctricas es China. Solamente en el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas en este país suman más de 45.000 instalaciones de este tipo que generan electricidad por cerca de 68GW. La gran explosión en el número de pequeñas centrales y grandes centrales se debe al gran desarrollo industrial y económico que ha experimentado este país. Sin embargo, este mismo desarrollo rápido ha originado mucho desorden para el control e integración de estas centrales de generación, las cuales no están completamente interconectadas y generan energía de manera desorganizada, sin estar acorde a las necesidades globales de su red de distribución.

Para solucionar esta problemática los autores [Cheng & Liu et al., \(2015\)](#), muestran como la recolección de información es la base para el control de centrales hidroeléctricas. La adquisición de datos en tiempo real es la función esencial del sistema que va desde las capacidades de generación basadas en los niveles de embalses hasta información de mantenimiento, programación de generación, generación de estadísticas entre otras.

El sistema analiza la racionalidad de la programación junto con otras fuentes de energía en consideración a la limitación de capacidad de transmisión para mantener la seguridad de la red eléctrica y coordinar la programación de la generación con otras fuentes de energía. Además, se ajusta la generación de grandes hidroeléctricas oportunamente para adaptarse a las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento de energía hidroeléctrica. Esta coordinación entre las estaciones y otras fuentes de energía podría reducir el riesgo de congestión de la red y como resultado la entrega de una transmisión más eficiente y menos costosa. En consecuencia, las estaciones de PCH pueden garantizar la generación, mejorar la fiabilidad del sistema, mejorar el factor de

potencia, y exportar más electricidad a las ciudades costeras de China donde se concentra el desarrollo industrial del país ([Cheng & Liu et al., 2015](#)).

3.2 Tendencias en sistemas de control en India

Autores como [Kishor & Saini, et al. \(2007\)](#) mencionan como los puntos de operación de plantas hidroeléctricas se rigen por dinámicas no lineales, cuyas características dependen de disrupciones internas y externas a los centros de generación.

Un elemento clave de cualquier planta de generación de energía hidroeléctrica es el gobernador. Este sistema de gobierno proporciona un medio de control de potencia y frecuencia. El regulador de velocidad incluye todos aquellos elementos, que son directamente sensibles a la velocidad y la posición o influencia de la acción de otros elementos del sistema de gobierno de velocidad. El mecanismo de control de velocidad incluye equipos tales como relés, servomotores, medidores de presión o dispositivos de amplificación de potencia y los vínculos entre el regulador de velocidad y regulador controlado por puertas/paletas. El regulador de velocidad normalmente acciona las puertas/paletas del gobernador que regulan la entrada de agua a la turbina a través del mecanismo de control de velocidad.

Regularmente, los gobernadores hidráulicos mecánicos y del tipo electro-hidráulico con controladores PID son más usados en centrales de generación. Sin embargo, las tecnologías de estos gobernadores se han desarrollado considerablemente en los últimos años. Recientemente, los gobernadores digitales han reemplazado gradualmente estos controladores analógicos. Los acontecimientos recientes en el campo de las tecnologías de control han impuesto un nuevo enfoque en los sistemas de control de la turbina con la aplicación de la inteligencia artificial (IA). Una de las aplicaciones más discutidas de la inteligencia artificial es el gobierno de la turbina a través de la sustitución de un gobernador electro-hidráulico estándar a un sistema con lógica difusa o redes neuronales o el uso de un controlador borroso híbrido y de redes neuronales ([Kishor & Saini, et al., 2007](#)).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de automatización se realizó siguiendo dos objetivos fundamentales: primero, el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de los niveles de los embalses Tunjita y La Esmeralda y segundo, el diseño y parametrización de la automatización de puntos críticos de la planta de generación.

4.1. Diseño de sistema de control.

Teniendo en cuenta que la medición de parámetros críticos de los afluentes se realizaba con métodos convencionales, perdiendo oportunidad de información, se diseñó un sistema de control que permitiera determinar el nivel de agua en el canal de descarga de agua turbinada, así como en el Río Lengupá y Pozos de Bombas, y en Tunjita Monte, centralizando dicha información en Sala de Control.

El diseño del sistema, para los sistemas de supervisión de niveles en ríos y canales de descarga y pruebas de sistemas, incorporó equipos de telemetría y actividades que se describen a continuación:

Para medir los niveles del agua en la represa Tunjita, se han usado sensores tipo radar por impulsos, como se puede ver en la [Fig.1](#), realizando las mediciones sin contacto físico directo, para establecer el nivel de las aguas superficiales del embalse en la zona de entrada a la compuerta de carga.

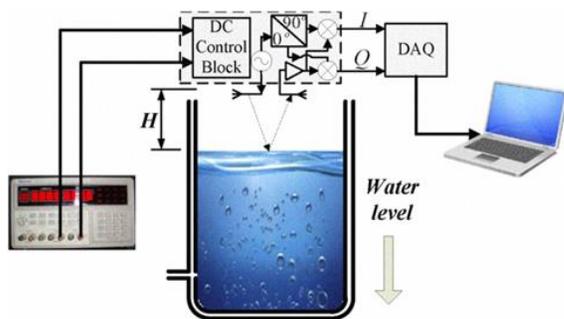


Fig.1. Sistema de Control de Nivel de Agua por Radar. Fuente: ([Wang, et al. 2013](#)).

Se realizó la programación y puesta en marcha de los equipos, acondicionando las señales para la

integración al sistema SCADA. Adicionalmente, se definieron intervalos por el usuario, para la configuración del sistema, que permite tiempos de actualización de los datos transmitidos desde los sensores a la Sala de Control.

En el caso del sistema de supervisión y control de la represa Tunjita, se implementó un Control Lógico programable para las compuertas de captación y desviación, así como sensores de nivel para control del embalse y del túnel de carga.

Por otro lado, en los ríos afluentes al embalse Tunjita, se implementaron estaciones de telemetría autónomas, alimentadas por energía solar, que envían de forma inalámbrica la información de nivel de los ríos: Tunjita, quebrada Onda y quebrada El Pino; esta información es luego retransmitida a través de enlaces de comunicación de fibra óptica hasta la Sala de Control.

4.2. Diseño de automatizaciones.

Por calidad y confiabilidad de la operación, se realizó el diseño e implementación de procesos automatizados, relacionados con puntos críticos de operación de la planta de generación. En este caso, fue necesario realizar el diseño del control y la programación de los dispositivos que ejecutarán esta tarea, para diferentes tipos de válvulas y para reguladores de velocidad, en el marco de sistema de control que incorpora elementos como:

Sistemas de control basados en tecnología de Control Lógico Programable (PLC), que permitió la automatización de las válvulas esféricas y mariposa, con la realización de pruebas y puesta en marcha de los diseños realizados.

Fue diseñado un sistema de control asociado a cada unidad generadora, a través de un gobernador, que permite controlar la Velocidad-Potencia de la máquina, para su operación confiable, eficiente y segura.

4.3. Desarrollo de un modelo de cambio en las prácticas de la organización.

Los procesos de automatización generan cambios en los métodos y las prácticas de las empresas que los implementan. En el caso de este proceso, los cambios estaban conectados con la gestión de los elementos y sistemas automatizados, que

permitieran hacer seguimiento y control, adaptando e integrando sistemas de información.

Esta parte del proceso, ha requerido un doble esfuerzo: desde el punto de vista tecnológico, la adopción y el desarrollo de sistemas de información, que permitan gestionar los procesos automatizados y los demás equipos de la compañía; desde el punto de vista organizacional, un diagnóstico preliminar tanto de métodos de trabajo, y un proceso de alineación inicial y revisión de los procesos de trabajo, como de evaluación de interfaces de los sistemas de información existentes, para posteriormente, realizar procesos de capacitación en los fundamentos de gestión de los sistemas automatizados y los activos.

Adicionalmente, se requirió automatizar el proceso de cálculo de indicadores para la compañía, a partir de la identificación y construcción de nuevos valores de control.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información que se obtiene de los procesos de automatización, relacionados con el monitoreo de los embalses y sus afluentes (ver [Fig. 2.](#) y [Fig. 3.](#)), es usada principalmente para la toma de decisiones operativas de la PCH y la represa la Esmeralda, ante crecientes y para la supervisión remota desde la sala de control de Chivor.



Fig. 2. Supervisión de Niveles del Río Lengupá, Canal de Descarga y Pozos de bombas en las unidades 1. Fuente: E. Propia.

Los datos tomados permiten: (i) identificar tendencias en el comportamiento hídrico del río Lengupá vs generación y (ii) realizar supervisión en línea del afluente del río Lengupá teniendo en cuenta los datos levantados en época invernal. Estas mismas actividades se realizan en los afluentes a las que se han instalado los equipos.

Posteriormente, se realizaron las pruebas de verificación de señales en la Sala de Control para garantizar la información de los sensores implementados en línea. En esta fase se miden variables como las señales de nivel, caudal y turbidez del agua las cuales pueden ser visualizadas en la Sala de Control.



Fig. 3. Estaciones de telemetría autónomas, en las quebradas afluentes de Tunjita. Fuente: E. Propia.

El desarrollo del proyecto relacionado con tecnologías de control, automatización, e información, buscaba integrar en tiempo real el monitoreo de los embalses y las cuencas, así como de los afluentes de los mismos. Estos desarrollos le permitieron a la compañía monitorear y tomar decisiones frente a posibles eventos de la naturaleza (desbordamientos e inundaciones), que podrían afectar los equipos, haciendo posible mantener la integridad de toda la infraestructura requerida para el proceso de generación de energía.

El desarrollo del proyecto generó procesos de apropiación del conocimiento, a través del cual se han desarrollado capacidades de programación, cambios organizacionales y transformaciones en la operación que han generado aportes en la calidad y productividad de la empresa. Adicionalmente, el resultado del proyecto fue postulado al concurso interno de la compañía a nivel internacional, “*Congress on Innovation, Technical Excellence and Sustainable Practices*”. Finalmente, algunos de los impactos generados por el desarrollo del proyecto se pueden ver en la [Tabla 1](#).

El proceso de desarrollo tecnológico realizado por la empresa, tiene un alto componente de información sensible y de alta importancia para la compañía, razón por la cual no se realizó una descripción más detallada y extensa del proceso de diseño y desarrollo de la solución de automatización en el presente artículo.

Tabla. 1. Impacto generado por el desarrollo del proyecto.

IMPACTOS	PROCESOS AES CHIVOR	
	MANUAL (ANTES)	AUTOMATIZADO (AHORA)
Calidad	Medición de parámetros críticos mediante sistemas convencionales.	El monitoreo y la medición de parámetros críticos como turbidez o caudales de agua, mediante procesos automatizados, ofrecen mayor nivel de confianza en el proceso de generación de energía
Calidad y productividad	Medición de variables estratégicas de la operación de manera discontinua, mediante sistemas convencionales.	La integración de señales y registro de eventos y sistemas de información, los cuales mejoraron el sistema de control automático de contadores, incrementándola eficiencia y calidad en la prestación del servicio de generación de energía.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de sistemas de control permite la operación óptima de las centrales hidroeléctricas generando menores costos de generación y mantenimiento correctivo.

El presente proyecto permitió la implementación de sistemas para la medición de parámetros de alta importancia, automatización de reguladores de velocidad y sistemas de información que integran los datos para la toma de decisiones rápidas y efectivas.

Dentro de la investigación se incluyó el diseño y parametrización de sistemas de control, de acuerdo con las necesidades específicas de los embalses, gobernadores de velocidad, integración de señales y registro de eventos y sistemas de información, previamente mencionados, destinados a mejorar el sistema de control automático de contadores. Se ha establecido un mayor nivel de eficiencia y calidad en la prestación del servicio de generación de energía.

Mayor investigación es necesaria en sistemas de integración de señales y la automatización del análisis de los datos para contar con mejores herramientas que redunden en mayor control y eficiencia en las plantas de generación de energía.

AGRADECIMIENTO

AES CHIVOR reconoce el aporte del Departamento Administrativo de Ciencia,

Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS, al apoyar proyectos de Desarrollo Tecnológico, a través de la convocatoria de Beneficios Tributarios, como el que da lugar al presente artículo.

REFERENCIAS

- Cheng, C., Liu, B., Chau, K. W., Li, G., & Liao, S., 2015. China' s small hydropower and its dispatching management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **42**: 43-55.
- Deqing, M. & Ying, Z., 2012. Automatic Measurement and Reporting System of Water Quality Based on GSM. *Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, Volumen Second International Conference IEEE, 1007-1010.
- HydroSanco, 2006. Medida de nivel en embalses: Evolución, posibilidades y tratamiento actual, Zaragoza, España: SMAGUA.
- Jarry-Bolduc, D., & Cote, E. (2014). Hydro energy generation and instrumentation & measurement: hydropower plant efficiency testing. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, **17**(2): 10-14.
- Junjun, T., 2010. Simulation Sthiudy on the digital electro-hydraulic servo system of speed governor system of turbine.. Changsha City, IEEE.
- Kishor, N., Saini, R. P., & Singh, S. P., 2007. A review on hydropower plant models and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(5): 776-796.
- Saraswati, M., Kuantama, E. & Mardjoko, P., 2012. Design and Construction of Water Level Measurement System Accessible through SMS. *Valetta, IEEE*, 48 - 53.
- Sierra, F. E., Sierra, A. F. & Guerrero, C. A., 2011. Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *INFORMADOR TÉCNICO*, **75**: 73-85.
- Singh, M. K., Naresh, R., & Gupta, D. K., 2013. Optimal tuning of temporary droop governor of hydro power plant using genetic algorithm. *InEnergy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, 2013 International Conference on IEEE, 1132-1137.
- Wang, G. y otros, 2013. Highly accurate noncontact water level monitoring using continuous-wave Doppler radar. Austin, TX, IEEE, 19 - 21.

- Zaev, E. y otros, 2012. Hydro power plant governor testing using hardware-in-the-loop simulation. Bar, IEEE, 271,274.
- Zhang, X. & Zhang, G., 2006. An adaptive fuzzy PID control of hydro-turbine governor. s.l., IEEE.

SOBRE LOS AUTORES

Luis Eduardo Niño

Ingeniero Electrónico, Especialista en Gerencia de Recursos Energéticos, con amplia experiencia en el desarrollo de proyectos de automatización y control de procesos. Principales áreas de interés investigativo: automatización y control de procesos orientados al sector eléctrico.

Mauricio Méndez

Ingeniero Mecánico, Especialista en Gestión de proyectos en ingeniería con las directrices del PMI. Amplia experiencia en la integración e implementación de iniciativas, metodologías, estándares y nuevas prácticas en el modelo de Gestión de activos, asegurando la gestión integrada, el enfoque en procesos. Experiencia en Implementación y seguimiento de indicadores de gestión.

Claudia Sánchez

Ingeniera Mecánica, Especialista en Innovación y Desarrollo de Negocios, Candidata a Magister en Gerencia de la Innovación Empresarial. Principales áreas de interés investigativo: Innovación y Desarrollo Tecnológico.

Hermann Fuquen

Ingeniero Industrial, graduado en la Maestría en Administración y Economía de la Innovación. Posee experiencia en modelación matemática para la optimización de cadenas de abastecimiento. Principales áreas de interés investigativo: Innovación y Desarrollo Tecnológico.