

Medición de variables hídricas asociadas a plantas de generación hidroeléctricas

Investigador Principal: Andrés González Mancera

Universidad de los Andes - Consejo Nacional de Operación

Octubre de 2020

Índice

1	Introducción	4
2	Variables hidrológicas y meteorológicas	6
2.1	Nivel	7
2.2	Caudal aportante	8
2.2.1	Aforo por el método área-velocidad	10
2.2.2	Aforo con perfilador acústico Doppler	11
2.2.3	Estimación del caudal mediante el método del índice de velocidad	12
2.2.4	Instrumentación y técnicas más usadas operativamente	14
2.3	Caudal turbinado	15
2.4	Vertimientos	16
2.5	Descargas no turbinadas	17
2.6	Volumen del embalse	17
2.7	Medición de la Precipitación	18
2.8	Incertidumbre en la medición de variables hidrométricas	18
3	Revisión y Referenciación Internacional	19
3.1	Brasil - ONS	19
3.2	Mercado Nord Pool	24
3.2.1	Suecia	25
3.2.2	Noruega	27
3.3	Canada	29
3.3.1	Quebec	31
3.3.2	British Columbia	32
3.4	Austria	33
3.5	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM	34
4	Mejores Prácticas para la Medición de Variables Hídricas de los Agentes Generadores en Colombia	34
4.1	EPM	34
4.1.1	Nivel	35
4.1.2	Aportes	36
4.1.3	Caudal turbinado	38
4.1.4	Vertimientos	38
4.1.5	Descargas no turbinadas	39
4.1.6	Volumen de embalse	39
4.1.7	Precipitación	40

4.1.8	Proceso de verificación y calidad	41
4.2	Lareif	42
4.2.1	Nivel	42
4.2.2	Aportes	42
4.2.3	Caudal turbinado	43
4.2.4	Vertimientos	43
4.2.5	Precipitación	43
4.2.6	Proceso de verificación y calidad	44
4.3	ISAGEN	45
4.3.1	Nivel	45
4.3.2	Aportes	46
4.3.3	Caudal turbinado	47
4.3.4	Vertimientos	47
4.3.5	Descargas no turbinadas	47
4.3.6	Volumen del Embalse	48
4.3.7	Precipitación	48
4.3.8	Proceso de verificación y calidad	49
4.4	Celsia	50
4.4.1	Nivel	50
4.4.2	Aportes	50
4.4.3	Caudal turbinado	51
4.4.4	Vertimientos	51
4.4.5	Descargas no turbinadas	52
4.4.6	Volumen de embalse	52
4.4.7	Precipitación	52
4.4.8	Proceso de verificación y calidad	52
4.5	ENEL - Emgesa	53
4.5.1	Nivel	53
4.5.2	Aportes	54
4.5.3	Caudal turbinado	55
4.5.4	Vertimientos y descargas	56
4.5.5	Volumen de embalse	56
4.5.6	Precipitación	56
4.5.7	Proceso de verificación y calidad	57
4.6	AES Colombia	58
4.6.1	Nivel	59
4.6.2	Aportes	59
4.6.3	Caudal turbinado	60

4.6.4	Vertimientos y descargas	61
4.6.5	Volumen de embalse	61
4.6.6	Precipitación	61
4.6.7	Proceso de verificación y calidad	61
4.7	Central Hidroeléctrica Urrá	62
4.7.1	Nivel	62
4.7.2	Aportes	63
4.7.3	Descargas turbinadas	63
4.7.4	Vertimientos y descargas	63
4.7.5	Volumen del embalse	64
4.7.6	Precipitación	65
4.7.7	Proceso de verificación y calidad	65
4.8	Conclusiones y resumen comparativo	66

Referencias	69
--------------------	-----------

1. Introducción

Un buen monitoreo del recurso hídrico requiere mediciones continuas y de buena calidad del recurso. En el artículo *The 5 Essential Elements of a Hydrological Monitoring Programme* de la Organización Mundial de Meteorología - WMO (*World Meteorological Organization*) se plantean los siguientes pilares para el desarrollo de un programa de medición exitoso [1]:

1. Sistema de manejo de calidad
2. Diseño de la red
3. Tecnología
4. Entrenamiento
5. Manejo de datos

El sistema de manejo de calidad incluye un conjunto de estándares operativos que gobiernan el proceso de producción de datos para garantizar que los datos son consistentes y de calidad conocida. En el desarrollo de un sistema de manejo de calidad, es importante tener en cuenta el concepto de ‘Aptitud para un Propósito’ (*Fitness for Purpose*). *Esto es, que el sistema implementado y la consecuente calidad de los datos estén de acuerdo al uso que se les va a dar.*

También es importante que los sistemas de manejo de calidad estén alineados con las expectativas de los usuarios de la información. Por ejemplo, históricamente los datos hidrométricos se publicaban anualmente como agregados diarios y estadísticas de valores extremos. Hoy día, la expectativa es contar con datos en tiempo real.

El diseño de la red es un proceso constante y continuo en el cual se instalan nuevas estaciones mientras otras se sacan de operación de acuerdo a los requerimientos, prioridades y presupuesto. El reto es encontrar un buen balance entre los objetivos de medición y la favorabilidad del sitio para instalar los instrumentos. Nuevamente, el proceso debe comenzar teniendo los requerimientos de los datos en mente.

En la selección de la tecnología se deben considerar aspectos tales como la exactitud, histéresis, resolución, sensibilidad y constante de tiempo de los instrumentos. Otros aspectos importantes incluyen la confiabilidad, precisión en las condiciones de operación, facilidad del acceso a la zona de medición, factores locales, entrenamiento y familiaridad con los equipos.

Con respecto a esto último, se debe tener en cuenta que ninguna inversión en tecnología puede compensar un mal manejo del proceso de recolección o manejo de los datos. Los errores causados por error de procedimiento son los más difíciles de detectar en los procesos de verificación de calidad.

Un aspecto importante, y muchas veces ignorado, es cómo se van a archivar, resguardar y administrar los datos después de la adquisición. Los datos hidrológicos son complejos y deben ser **validados, analizados y reportados de manera adecuada**. Existen sistemas especializados para el manejo de datos hidrológicos que pueden ayudar en esta tarea.

La operación óptima de una central hidroeléctrica y la correcta planeación y uso adecuado de los recursos energéticos en un sistema interconectado requiere de una red de monitoreo del recurso hídrico.

A nivel mundial existen multitud de normas, estándares, guías y manuales de mejores prácticas para la medición de variables hidrométricas desarrollados entidades internacionales o nacionales. Principalmente relevante para la medición de variables hídricas son los manuales y guías de la WMO.

El objetivo de este documento es recopilar, revisar y referenciar las prácticas estándar para la medición de datos hidrológicos, especialmente aquellos asociados a la operación, modelado y control de plantas hidroeléctricas en el mundo.

Las principales variables hidrométricas de interés son los niveles de embalses y ríos, así como los caudales de estos últimos asociadas a una planta de generación hidroeléctrica. También es de interés en la operación de una hidroeléctrica poder conocer con precisión el caudal que pasa por la turbina, así como por otras estructuras de vertimiento y control.

En este documento se presentarán de manera general los principales métodos para la medición de las variables hidrométricas de interés. Sin embargo, no pretende ser un manual de mediciones por lo que no se describirán con un alto nivel de detalle dichos métodos. Por el contrario, se tratará de ilustrar de manera general las metodologías y requerimientos mínimos adoptados a nivel mundial en

la industria, indicando los documentos relevantes para que el lector interesado pueda profundizar en los detalles. Las diferentes guías y manuales de la WMO u otros documentos referenciados tienen amplia y detallada descripción de los diferentes métodos e instrumentos. Además, hay varias alternativas para cada medición, entre las cuales la mejor opción dependerá de las condiciones en campo y otra multiplicidad de consideraciones.

El Capítulo 2 de este documento inicia con listan y discuten los principales métodos para la medición de las variables hidrológicas, hidráulicas y meteorológicas de interés. En este capítulo se referencian los documentos de los principales organismos internacionales y autoridades internacionales en el tema. En el Capítulo 3 se recopilan algunas de las regulaciones, prácticas y principios de operación de las redes de monitoreo hidrológico en países cuyas matrices de generación son dominadas por el recurso hidráulico. En el Capítulo 4 se recopilan las mejores prácticas de los agentes generadores en Colombia. Finalmente, en el Capítulo 5 se presenta un resumen.

2. Variables hidrológicas y meteorológicas

No es posible estandarizar el diseño de una red de monitoreo para todas las plantas de generación hidroeléctricas, ya que ésta se debe ajustar a las particularidades de cada caso. Sin embargo, existen lineamientos, guías y normas para la medición de cada variable de interés.

La WMO tiene el programa de Hidrología y Recursos Acuáticos (*Hydrology and Water Resources*) encargado de mejorar la medición e información hídrica. En este sentido ha publicado gran cantidad de manuales y guías con el propósito de documentar y estandarizar los procesos hidrométricos. Entre los documentos relevantes para el objeto de este documento están:

1. *Methods of Measurement and Estimation of Discharges at Hydraulic Structures*, WMO - No.658, 1986 [2].
2. *Guía de prácticas hidrológicas, Volumen I, Hidrología - De la medición a la información hidrológica*, WMO - No.168, 2011 [3].
3. *Guía de prácticas hidrológicas, Volumen II, Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*, WMO - No.168, 2011 [4].
4. *Technical Regulations, Volume III, Hydrology*, WMO - No.49, 2006 [5].
5. *Manual on Stream Gauging, Volume I - Fieldwork*, WMO - No.1044, 2010 [6].
6. *Manual on Stream Gauging, Volume II - Computation of Discharge*, WMO - No.1044, 2010 [7].
7. *Survey on Field Discharge Measurement Instrumentation and Techniques Used Operationally - DRAFT*, WMO, prepared by Janice M. Fulgor and Zsuzsanna Buzás, 26 December 2009 [8].
8. *Guidelines for the assessment of uncertainty of hydrometric measurements*, WMO, prepared by Marian Muste, 28 February 2009 [9].
9. *Technical Material for Water Resources Assessment*, WMO - No.1095, 2012 [10]

Los documentos listados anteriormente cubren de manera amplia y completa las técnicas comúnmente utilizadas para las mediciones de las variables hidrológicas y meteorológicas, entre otras.

También existen estándares internacionales tales como el ISO 18365:2013 *Hydrometry — Selection, establishment and operation of a gauging station* [11] el cuál establece los requerimientos para la implementación y operación de una estación de monitoreo de nivel o nivel - caudal de lagos, embalses, ríos o canales. El estándar ISO 3455:2007 *Hydrometry — Calibration of current-meters in straight open tanks* [12] especifica el procedimiento para la calibración de correntómetros mecánicos (molinetes), así como de tipo electromagnético, en canales abiertos. Igualmente algunos países han desarrollado sus propias estándares para la realización de mediciones hidrométricas, por ejemplo, el estándar Sueco SS-EN ISO 748:2007 [13] *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats* especifica los métodos para determinar la velocidad y área seccional de agua en canales abiertos para el cálculo del caudal.

2.1. Nivel

El nivel de agua es la elevación de la superficie de una corriente fluvial, lago u otra masa de agua respecto de un valor de referencia [3], y puede utilizarse directamente para estimar flujos o los volúmenes de almacenamiento de embalses y lagos. Mediante su correlación con estas variables, el nivel de agua constituye el punto de partida para obtener registros de caudal o de reserva.

El lugar seleccionado para observar la altura del agua debe responder a la finalidad de los registros que se desea obtener y adecuarse a la accesibilidad del lugar. La selección del instrumento, así como su ubicación, debe responder a las condiciones hidráulicas en ríos, especialmente cuando se utilizan los niveles para calcular valores de caudal. En los embalses la ubicación depende de las características del mismo [3].

Las técnicas para la medición de nivel se pueden dividir en dos grupos: técnicas de registro no continuo o de registro continuo. Ahora se describirán algunas de las técnicas más comúnmente utilizadas.

Entre los medidores sin grabación, los más habituales corresponden a los siguientes tipos [3; turnipseedDischargeMeasurementsGaging2010]:

- Regla o mira graduada vertical o inclinada;
- Sensor de calbe con contrapeso;
- Sensor de cadena;
- Sensor de cinta eléctrica

Estos métodos requieren que se realice una lectura del instrumento, de forma manual, para conocer y registrar el nivel del agua.

Por el lado de los métodos de medición continua, se utilizan diversos tipos entre los más comunes se encuentran los siguientes tipos:

- Flotador;
- Sensor de burbuja;
- Transductores de presión sumergibles y no sumergibles;
- Senores sin contacto: radar, ultrasónico u óptico.

Estos métodos permiten el registro y transmisión de datos de manera continua.

Dos tipos de sensores de registro continuo, comúnmente utilizados recientemente son los ultrasónicos o de radar. El sensor ultrasónico está basado en la velocidad de desplazamiento de un impulso de frecuencia ultrasónica (>20 kHz), que es emitido por un transmisor situado en una estructura situada instalada sobre el lago o el río. Cuando el impulso llega a la superficie de la masa de agua, emite un eco que es captado por el sensor. El tiempo T transcurrido desde el momento de la emisión del impulso y el momento de la recepción del eco por el sensor es directamente proporcional a la distancia d entre el sensor y la superficie del agua, e inversamente proporcional a la velocidad del impulso en el aire. El sensor de radar es similar al ultrasónico, aunque utiliza frecuencias altas (en torno a 20 GHz). Presenta la ventaja de que, a altas frecuencias, la velocidad de desplazamiento del impulso no resulta afectada por la temperatura del aire [3].

La Guía de Prácticas hidrológica Vol. 1 [3], tiene gran detalle y descripción de cada uno de los métodos y sensores, así como consideraciones importantes a tener en cuenta para la instalación y operación de cada uno de ellos.

La precisión mínima de las mediciones recomendada para mediciones de nivel en embalses es de un (1) cm para dispositivos de registro no continuo y tres (3) mm para mediciones de registro continuo. En el caso de instrumentos utilizados para determinar el caudal mediante la curva nivel - caudal la precisión de las mediciones del nivel se recomienda que sea el mayor valor entre 3 mm y el 0.2 % de la profundidad total del agua [7].

2.2. Caudal aportante

El caudal fluvial, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo, es la tasa a la que el agua discurre a través de una sección transversal. La estimación del caudal en las estaciones hidrométricas se hace de forma indirecta, midiendo el nivel del río y asociando dicha medición a la cuantificación de un caudal a través de la curva de gasto (Nivel – Caudal) de la sección de medición. La curva de gasto de la sección se construye haciendo un ajuste estadístico entre datos asociados de nivel y caudal obtenidos mediante aforos líquidos. El nivel se mide de acuerdo a los métodos discutidos en la sección anterior.

La relación nivel - caudal es variable en el tiempo, esta variabilidad se puede dar de forma gradual o de manera abrupta reflejando cambios físicos de las secciones hidráulicas donde están ubicadas las estaciones [7]. Esta relación también está sujeta a fluctuaciones aleatorias menores, resultado de la fuerza dinámica del agua en movimiento y de la recolección residuos o vegetación acuática en secciones de control de flujo. Debido a que es virtualmente imposible tener en cuenta esas fluctuaciones menores, se considera adecuada una curva de gasto que promedie los caudales medidos para un rango de niveles. Más aún, como se reconoce que las mediciones de caudal no están libres de incertidumbre, una curva desarrollada mediante el ajuste de un grupo de datos por nivel puede ser conveniente.

Las condiciones en la sección de control cambian a lo largo del año debido a la vegetación u otras condiciones aguas abajo y por lo tanto puede ser necesario desarrollar curvas de gasto para diferentes estaciones. También es importante tener en consideración el nivel de incertidumbre relacionado con las técnicas para la medición del caudal usadas para la determinación de la curva de gasto [14].

Una práctica común es realizar aforos líquidos de manera periódica, usualmente mediante el método de los molinetes u otro que se adapte de manera adecuada a las condiciones en campo [3], y relacionarlo con el nivel de agua correspondiente medido mediante una mira o un equipo electrónico. Las mediciones de caudal se expresan como función del nivel correspondiente para definir la curva de gasto. Para una estación nueva se necesitan suficientes mediciones para definir la relación nivel - caudal para todo el rango de niveles. En adelante se requieren mediciones periódicas para confirmar la estabilidad de la curva de gasto o para hacer seguimiento a cambios en la misma. **Se recomienda un mínimo de diez mediciones de caudal por año [7], a menos que se haya demostrado que la relación nivel - caudal es completamente estable en el tiempo, en cuyo caso la frecuencia de mediciones de caudal se puede reducir.** Es muy importante establecer la relación nivel - caudal para condiciones extremas [3].

Los datos obtenidos en la estación de aforo se revisan y analizan a lo largo del año. Las curvas de nivel - caudal se establecen ya sea por métodos gráficos o, más comúnmente hoy día, mediante métodos basados en software especializado [7].

La calidad de los datos a partir de la curva nivel - caudal, u otro método indirecto, depende de la calidad de los aforos líquidos utilizadas para la realización de las curvas de calibración. La exactitud de la medición del caudal dependerá del período de tiempo necesario para efectuar la medición y de la variación de la altura del agua y del caudal durante la observación. Las variaciones de las condiciones aguas abajo durante la medición podrán influir en el resultado, por lo que convendría evitarlas [3].

Si no se cuenta con mediciones de caudal para valores de nivel altos obtenidos en un periodo dado, la curva de gasto debe ser extrapolada hasta dichos valores. Tales extrapolaciones siempre

están sujetas a errores e incertidumbres. No obstante, los errores se pueden minimizar si se tiene conocimiento sobre los principios hidráulicos que gobiernan la forma de las curvas.

Las estructuras de control de flujo inestables o en condiciones de remansos variables pueden afectar las curvas de gasto. También pueden surgir dificultades en presencia de histéresis durante crecimientos o decrecimientos rápidos de caudal.

El estándar ISO 7066-2:1988 *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices — Part 2: Non-linear calibration relationships* [15] describe los procedimientos para el ajuste de expresiones cuadráticas, cúbicas o de mayor orden para el ajuste de datos no-lineales. También establece los criterios para estimar la incertidumbre asociada a la curva de calibración. El estándar ISO 5168:2005 *Measurement of fluid flow — Procedures for the evaluation of uncertainties* [16] establece los principios y describe los procedimientos para evaluar la incertidumbre en la medición caudal.

2.2.1. Aforo por el método área-velocidad

La medición del caudal utilizando el método de velocidad-área es uno de los métodos que se pueden utilizar para desarrollar las curvas de nivel - caudal o calibrar otras relaciones para la determinación del caudal. En este método la profundidad del flujo en la sección transversal se mide en varias verticales mediante una varilla o hilo de sondeo. Al mismo tiempo que se mide la profundidad, se efectúan observaciones de la velocidad con algún tipo de correntómetro, por ejemplo, de molinetes. El ancho, profundidades y velocidades medidas permiten calcular el caudal para cada segmento de la sección transversal. La suma de estos caudales parciales será el caudal total [3].

La velocidad de flujo en un punto suele medirse mediante el conteo de las revoluciones de un rotor de molinete durante un breve período de tiempo. Los rotores de molinete habitualmente utilizados son de dos tipos: cazoleta, provisto de un eje vertical y de hélice, de eje horizontal. Los molinetes se someten a calibración con el fin de abarcar el intervalo de velocidades de flujo que se desea medir.

Las observaciones de velocidad se efectúan en uno o más puntos de cada vertical mediante un recuento de las revoluciones del rotor durante un período no inferior a 30 segundos. Cuando la velocidad experimente pulsaciones de amplio período, el tiempo de exposición aumentará acorde [3].

La exactitud de una medición de caudal dependerá del número de verticales en que se obtengan observaciones de profundidad y de velocidad. Las verticales de observación estarán situadas de modo que definan de manera óptima la relación de elevación del lecho del río y la variación horizontal de velocidad. Por lo general, el intervalo entre dos verticales cualesquiera no será superior a 1/20 de la anchura total, y el caudal de cada segmento no será superior al 10 por ciento del caudal total [3], [12].

Flujos inestables, material suspendido en el canal, incorrecta alineación de los instrumentos y el flujo, uso de dispositivos de medición por fuera de su rango de calibración, perturbación por el viento o que el dispositivo de medición no se sujete o se monte de manera apropiada son posibles fuentes de error en la medición de la velocidad son [12]

La incertidumbre total en la medición del caudal es una combinación de la incertidumbre de todos los componentes: medición del ancho y profundidad de cada elemento, interpolación de la profundidad entre verticales y en la medición de cada velocidad. Se acepta que la incertidumbre total en la medición del ancho es menor al 1 %. Para las mediciones de profundidad la incertidumbre se ubica entre el 1 % y el 3 % [17]. La profundidad puede ser difícil de medir debido a variaciones en el nivel durante el proceso de medición. Si la velocidad se mide a dos profundidades en entre 20 a 25 verticales bajo condiciones no extremas, el error estándar esperado en la medida del caudal es aproximadamente 5 % con un 95 % de confianza [4], [12], [18].

Existen otros métodos para la medición del caudal que se acomodan a condiciones particulares del río. Estos métodos están descritos en el manual de la WMO [3]. Se listan algunos métodos relativamente nuevos para la medición del flujo: métodos ultrasónicos, métodos electromagnético y método basados en el efecto Doppler. El método ultrasónico y el método electromagnético permiten obtener registros de manera continua.

El estándar ISO 748:2007 *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats* [19] especifica los métodos para determinar la velocidad y el área seccional en canales sin hielo y para el subsecuente cálculo del caudal. El estándar ISO 1088:2007 *Hydrometry — Velocity-area methods using current-meters — Collection and processing of data for determination of uncertainties in flow measurement* [20] estandariza la recolección y procesamiento de datos para la determinación de las incertidumbres en los aforos de caudal en canales abiertos usando el método del área-velocidad utilizando correntómetros.

2.2.2. Aforo con perfilador acústico Doppler

En los años noventa se desarrolló el perfilador de corriente de efecto Doppler (ADCP), el cual utiliza energía acústica para determinar el flujo desde una embarcación. El instrumento consta de cuatro transductores ultrasónicos ortogonales fijados a una barca en movimiento. A medida que la barca atraviesa el río, el instrumento va midiendo el desplazamiento de frecuencia de las señales reflejadas y obtiene los vectores de velocidad en volúmenes uniformemente espaciados, conocidos como celdas de profundidad. Tras descartar la velocidad de la embarcación, y basándose en la geometría del cauce, definida también por el instrumento, se calcula el caudal. Esta técnica se viene utilizando con éxito para medir corrientes relativamente abundantes. Más recientemente, ha habido intentos de medir corrientes menores (de profundidad inferior a 2 m) mediante instrumentos portátiles o instalados en el sitio [3].

Basado en los principios explicados en el párrafo anterior, el Servicio de Geología de Estados Unidos - USGS (*U.S. Geological Survey*), así como los fabricantes de equipos para la medición de ADCP, han desarrollado paquetes de software diseñados para procesar los datos recolectados mediante ADCP para calcular el caudal en tiempo real [21]. El documento *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler* por Michael R. Simpson del USGS contiene detalles sobre el funcionamiento, operación y otras consideraciones de estos equipos.

El método ADCP se viene convirtiendo en uno de los métodos más usados para la medición del caudal. Es considerado un método muy preciso para la estimación de los datos de caudal. Sin embargo, la determinación de la incertidumbre para estas mediciones es un procedimiento extremadamente complejo. Muchos factores y fuentes de error están involucrados en la derivación matemática de la incertidumbre del ADCP. El Manual para la Medición de Caudal, volumen 1 [6] tiene una discusión completa sobre el proceso en el Capítulo 10.

El estándar ISO/TR 24578:2012 *Hydrometry — Acoustic Doppler profiler — Method and application for measurement of flow in open channels* [22] estandariza los procesos para la aplicación de esta técnica.

2.2.3. Estimación del caudal mediante el método del índice de velocidad

En años recientes, debido al incremento en la disponibilidad de instrumentos acústicos para la medición de la velocidad, el método del índice de velocidad se ha hecho más prevalente. En realidad cualquier instrumento que permita medir la velocidad de manera continua puede utilizarse para la aplicación de este método aunque los métodos acústicos o electromagnéticos, que permiten realizar mediciones de manera continua, son más comunes.

El método del índice de velocidad puede ser efectivo para estimar el caudal en algunas condiciones cuando el método de la relación nivel - caudal no es efectivo, por ejemplo, en la presencia de remansos variables.

En el método del índice de velocidades, la velocidad del agua medida por un instrumento en una porción del río se utiliza como un índice de la velocidad media en el canal. La velocidad media estimada utilizando dicho método se combina con el área transversal para generar registros de caudal. Los instrumentos que generalmente se utilizan para medir la velocidad en el método del índice de velocidad incluyen los dispositivos de velocidad acústicos - AVMs (*Acoustic Velocity Meters*), dispositivos de velocidad acústicos Doppler - SDVM (*Acoustic Doppler Velocity Meters*) y los perfiladores acústicos Doppler - ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*). La velocidad medida por el instrumento y que se utiliza como parámetro independiente en el método del índice de velocidad se denomina el índice de velocidad.

El método consiste en la utilización de dos curvas de relación: nivel - área transversal, e índice de

velocidad - velocidad media para calcular el caudal. Para realizar una medición de caudal se parte de la medición de nivel de agua para estimar el área efectiva utilizando una curva desarrollada para tal propósito, luego a partir del índice de velocidad y la curva de relación se estima la velocidad promedio, finalmente el caudal se estima como la multiplicación de esos dos parámetros.

La curva nivel - área transversal establece la relación entre esas dos variables y se debe obtener lo más cerca posible al sitio de medición del índice de velocidad. Se desarrolla con base a datos recolectados en una sección transversal dada, denominada sección transversal estándar. En lo posible, dicha sección transversal debe ser lo más estable posible. Se deben realizar revisiones periódicas de la sección transversal para comprobar cambios y ajustar la correspondiente curva de relación nivel - área transversal.

La curva índice de velocidad - velocidad media relaciona la velocidad medida en una sección del canal con la velocidad media en la sección transversal estándar correspondiente. Varias mediciones de caudal en el rango esperado se deben obtener para una adecuada obtención del índice de velocidad.

El caudal $Q = VA$ se calcula de la siguiente manera:

1. Los valores de nivel se verifican y se realiza control de calidad. Estos valores se usan para estimar el área efectiva a partir de la curva nivel - área transversal.
2. Los valores de índice de velocidad se verifican y se realiza control de calidad. Estos valores se usan para estimar la velocidad media a partir de la curva índice de velocidad - velocidad media.
3. Para cada dato de medición de nivel y correspondiente índice de velocidad se calcula el valor de caudal (Q) multiplicando el área (A) por la velocidad media (V). Los valores medios del caudal se pueden estimar a partir del promedio de los valores individuales de caudal a lo largo del día.

El Manual para las Mediciones de Caudal Vol 2 de la WMO [7] revisa y discute algunas de las fuentes de error en la estimación del caudal utilizando el método del índice de velocidad. Como cualquier método experimental, los valores medidos están sujetos a posibles errores de precisión y de sesgo. Estos errores se propagarán a las cantidades calculadas usando dichas mediciones. Las principales fuentes de error identificadas están asociadas a los instrumentos para la medición del área y el índice de velocidad. En la práctica, los errores asociados a los instrumentos para la medición del nivel y la velocidad tienden a ser pequeños y distribuidos de manera aleatoria (normal). La principal fuente de error es la incertidumbre en el desarrollo de la curva índice de velocidad - velocidad media.

Para el cálculo del caudal en condiciones más complejas, como por ejemplo la presencia de ramificaciones, flujos altamente inestables o con mareas, por ejemplo, el Manual de la WMO ofrece métodos alternativos que mejoran precisión bajo estas condiciones [7]. Algunos ejemplos

son el método del flotador y medición del caudal mediante métodos de conductividad eléctrica (trazadores).

2.2.4. Instrumentación y técnicas más usadas operativamente

Fulford y Buzás [8] desarrollaron un estudio en el que interrogaron a los servicios de mediciones hidrológicas alrededor del mundo. En dicho estudio se recogieron los estándares utilizados operativamente para medición del caudal. En el estudio se incluyen datos correspondientes a servicios hidrológicos alrededor del mundo. El continente del que se tienen más respuestas es Europa.

En cuanto a los instrumentos para la medición de velocidad, se estableció que en más del 65 % de los casos se utilizan dispositivos mecánicos, los dispositivos acústicos corresponden a menos del 10 % de las mediciones. No se indicó el uso de instrumentos de hilo caliente/frío, tubos de Pitot, velocimetría Doppler laser, medidores de defección (o arrastre), desprendimiento de vórtices o velocimetría de imágenes de partículas.

La mayoría de servicios hidrológicos consultados utilizan dispositivos mecánicos para más del 50 % de sus mediciones de velocidad. Más del 25 % de los servicios utilizan dispositivos mecánicos para *todas* sus mediciones. El dispositivo más usado es de eje horizontal (tipo hélice).

Los dispositivos electromagnéticos son usados por aproximadamente un tercio de los servicios consultados para realizar sus mediciones. De aquellos que usan dispositivos electromagnéticos, estos son usado en menos del 40 % de las mediciones.

Más de la mitad de los servicios consultados utilizan instrumentos acústicos Doppler. Sin embargo, estos instrumentos son usualmente utilizados para menos del 50 % de las mediciones de velocidad. Solo dos servicios usan este tipo de instrumentos para más del 70 % de sus mediciones de velocidad. La mayoría de los servicios usan instrumentación acústica Doppler para menos del 10 % de sus mediciones.

Cinco servicios hidrológicos, Australia, Canada, Estonia, Suecia y los Estados Unidos utilizan equipos de la compañía Sontek Flowtracker, un dispositivo para medir velocidad acústico que mide la velocidad en un punto en el flujo. Cuando se usa este dispositivo, el caudal se determina con el mismo procedimiento que cuando se usa un dispositivo mecánico.

Con respecto a los dispositivos comúnmente utilizados para medir el nivel de agua, se estableció que el 38 % de las mediciones se realizan con sensores de presión sumergibles equipado con sistemas de adquisición de datos. En el 23.8 % de los casos se utilizan sistemas basados en pozos con flotador. Otro sistema comúnmente utilizado es el basado en el burbujeo de un gas.

Algunos servicios hidrológicos utilizan equipos basados en técnicas sin contacto, por ejemplo, los que utilizan radar o sensores acústicos ubicados por encima del agua. Seis servicios declararon usar este tipo de sensores, tres de ellos para más de la mitad de las mediciones que realizan.

En cuanto a los períodos de calibración, los intervalos incluyen los 1, 3, 12 y 36 meses.

Para la medición del caudal, el método más usado para el monitoreo continuo del caudal es el método de la curva nivel - caudal, utilizado en la mayoría de estaciones. Para la elaboración de dichas curvas, los métodos más usados son los basados en velocidad-área correspondiente al 77 % de los casos.

2.3. Caudal turbinado

El caudal utilizado para la generación de energía puede ser estimado a partir de medición directa o a partir del factor de conversión y mediciones de la potencia eléctrica generada.

Entre las técnicas de medición directa, se pueden utilizar métodos similares a los descritos en las secciones anteriores secciones aguas arriba o aguas abajo del conducto donde existan condiciones de canal abierto. Sin embargo, debido a que se tiene un flujo a presión en una tubería también es posible realizar mediciones mediante el método de la variación de presión. También se encuentran disponibles comercialmente dispositivos electromagnéticos, acústicos ultrasónicos, acústico Doppler y laser, entre otros.

Para el caso de turbinas de reacción, el caudal puede estimarse mediante la medición de la caída de presión en la voluta. La voluta de una turbina de reacción tiene un diámetro decreciente, siendo más grande a la entrada donde se junta con la tubería forzada. Se instala un conjunto de boquillas para la medición de la presión a cada extremo de la voluta, la cual conforma, en efecto, una sección de ‘venturi’. El caudal se puede calcular mediante la ecuación:

$$Q = K\sqrt{\Delta h}$$

donde Q es el caudal, K es una constante de calibración y Δh es la caída de presión. La constante K se determina a partir de mediciones del caudal, preferiblemente hechas para el rango completo de operación, y correspondientes valores de caída de presión. La calibración debería permanecer constante siempre y cuando su eficiencia no cambie [7].

Una alternativa posible, o en algunos casos necesaria, es considerar la turbina en sí misma como el sistema de medición de flujo. En este caso es necesario calibrar la turbina o dispositivo hidráulico. Es necesario calibrar el dispositivo en el campo, *bajo las condiciones de operación reales*. La calibración se realiza midiendo el caudal con un medidor de corriente en la sección de carga o de descarga donde existen condiciones de canal abierto. Si no es posible realizarlas de esta manera, se pueden utilizar los métodos que se mencionan más abajo en esta sección. Este método se denomina factor de conversión.

Las curvas que relacionan el caudal con la potencia se pueden desarrollar midiendo el caudal para

observaciones de potencia en periodos para los que el caudal se mide para varias condiciones de operación. Se pueden desarrollar tablas o curvas a partir de estos datos medidos que muestren el caudal para tipos específicos de operación. La calibración puede cambiar en el tiempo cuando se presenten cambios en la eficiencia del equipo resultado largo uso u otros factores que causen deterioro [7].

El método de Gibson o de la variación de presión fue especialmente desarrollado para calcular el caudal en un conducto regulado por válvulas, turbinas u otro dispositivo de regulación ubicado en el extremo de la salida. El conducto debe tener por lo menos 7.5 m de longitud, pero preferiblemente más en la sección aguas arriba de la válvula o dispositivo de regulación. Sin embargo, el conducto no necesita tener sección transversal uniforme. Aunque el método de Gibson requiere de cierta instrumentación especializada, esta no es excesivamente costosa ni difícil de operar. El método consiste en medir los cambios en la diferencia de presión entre dos puntos de la tubería durante un cierre total de las válvulas (de regulación o sistemas de admisión en turbinas). De esta manera, el caudal total que estaba transitando antes del cierre se obtiene al integrar los cambios de la diferencia de presión medidos durante el tiempo de cierre. El método requiere algo de tiempo ya que se necesitan varias pruebas en las que repetidamente se cierre el flujo y se vuelva a llevar a estado estacionario. En general, es comúnmente aceptado que el método de Gibson es muy exacto para medir el caudal [7]. Se debe tener en cuenta que el este método no permite un registro continuo del caudal turbinado pero es efectivo para la calibración de, por ejemplo, el método del factor de conversión.

Recientemente Adamkowski y coautores [23] revisaron la aplicación y efectividad del método basándose en modelos teóricos, en laboratorio y el campo. La conclusión es que no obstante existen métodos modernos de medición, incluyendo los de ultrasonido, el método de Gibson es aún aplicable en la práctica y tiene el potencial de reducir la incertidumbre en mediciones.

2.4. Vertimientos

El volumen evacuado a través de un vertedero se estima de formas distintas dependiendo del tipo de vertedero. El Manual para la Medición del Caudal, Volumen 2 de la WMO [7] en el Capítulo 5 contiene una discusión sobre la medición del caudal en este tipo de estructuras. El Capítulo describe con detalle los procedimientos para la calibración y elaboración de curvas de descarga para diferentes tipos de compuertas, comúnmente utilizadas para control de flujo en presas.

Para compuertas y válvulas, es deseable generar relaciones de caudal contra apertura del dispositivo para diferentes cabezas. Para el desarrollo de las curvas o tablas es necesario realizar mediciones para todo el rango de aperturas del elemento y cabezas de operación. Generalmente las relaciones expresan el caudal correspondiente a un porcentaje de apertura de la compuerta para la cabeza correspondiente.

De esta manera es posible estimar el caudal vertido mediante mediciones de la apertura de las compuertas y el nivel del embalse.

2.5. Descargas no turbinadas

Esta variable corresponde a descargas realizadas a través de compuertas intermedias o de fondo. En el primer caso, las técnicas de estimación son las mismas de los caudales vertidos, en el segundo, se pueden usar las mismas técnicas de los caudales turbinados o tuberías a presión. También es posible realizar mediciones aguas abajo de la descarga, en este caso se pueden usar las técnicas descritas para la medición de los aportes.

2.6. Volumen del embalse

Las mediciones volumétricas conciernen a la definición de almacenamiento de agua en lagos o embalses. Para estas mediciones en lagos o embalses existentes se utilizan métodos batimétricos, o para los volúmenes de embalses proyectados se utilizan métodos topográficos.

Para medir el volumen de un embalse habrá que efectuar lecturas batimétricas. Por lo general, esta operación se efectúa desde una embarcación con instrumentación especializada. Para las profundidades se tomará como referencia una cota fija y una escala de nivel o un limnógrafo, a fin de poder observar las variaciones de la altura.

Las mediciones de profundidad pueden utilizarse para representar gráficamente las isobatas, y el volumen del embalse por encima de un plano de referencia puede calcularse mediante doble integración (por lo general, gráfica) de la red de isobatas.

El estudio de la batimetría se lleva a cabo mediante diferentes técnicas, el uso de cada una de ellas puede dar diferentes resultados en función de la precisión utilizada. Entre las técnicas más usadas destacan las ecosondas Monohaz y Multihaz. Este sistema permite emitir ondas de sonido que miden la distancia entre la superficie del agua y el fondo del embalse, así como objetos suspendidos en ésta o que reposan en el fondo.

La diferencia entre el mono y multihaz es que la sonda monohaz permite obtener la profundidad en un punto, de forma de que al mover la embarcación utilizando la sonda monohaz, se tiene la batimetría de una línea. Mientras que, la sonda multihaz permite obtener la profundidad de una línea, de forma que al mover la embarcación se tiene la batimetría de un área [24]. Esta última, representa una técnica avanzada para la realización de batimetrías de alta resolución con cobertura 100 % del fondo acuático a través de sondeos con múltiples haces y corrección de rumbo, cabeceo, balanceo y guiñada.

La Organización Hidrográfica Internacional - OHI en su documento titulado *Normas De La Ohi Para Los Levantamientos Hidrograficos* [25] establece los principios conceptuales y estandariza los procedimientos para realizar batimetrías.

El IDEAM también cuenta con el documento *Metodología Para Realizar Trabajos De Hidrotopografía* [26] en el cual se describen y establecen algunos lineamiento para la realización de este tipo de estudios.

2.7. Medición de la Precipitación

El objetivo principal de cualquier método de medición de la precipitación es obtener muestras representativas de la precipitación en la zona a que se refiera la medición. Es muy importante escoger cuidadosamente el emplazamiento, la forma y exposición del pluviómetro. También existen instrumentos de medición sin registro continuo y con registro continuo. La Guía de Prácticas Hidrológicas, Vol. 1 de la WMO [3] y el Protocolo de Monitoreo del Agua del IDEAM [27] contienen descripciones detalladas sobre la selección, ubicación y operación de estos instrumentos.

2.8. Incertidumbre en la medición de variables hidrométricas

La incertidumbre en la caracterización de variables hidrométricas resulta de la complejidad de los fenómenos físicos y de errores en los procesos de medición [9].

En un proceso de medición típico varios parámetros físicos son medidos, por ejemplo, velocidad de flujo, profundidad, ancho del canal, entre otros, y a partir de estos alguna cantidad se calcula, por ejemplo, caudal. De esta forma los principales pasos para un análisis de incertidumbre son: a) estimación de las incertidumbres asociadas con la medición de cada variable individual y b) la propagación de cada incertidumbre al resultado final. [28]

Por ejemplo, la incertidumbre en el caudal derivado a partir de la curva nivel - caudal se puede expresar como:

$$u^2(Q_T) = u_{RC}^2(Q) + u_{HC}^2(Q) + \left(\frac{\partial Q}{\partial h}\right)^2 u^2(h_t)$$

donde

$u_{RC}^2(Q)$ es la incertidumbre relacionada con la extrapolación de la curva de gasto para incluir mediciones por fuera del rango de calibración, $u_{HC}^2(Q)$ es la incertidumbre debido a condiciones difíciles durante la medición tales como histéresis, crecimiento de vegetación o cambios de geometría en la zona de control de la sección y $u^2(h_t)$ es la incertidumbre en la medición del nivel.

La incertidumbre de cada una de las variables medidas depende no solo de las características de los instrumentos, sino también de la variabilidad de la cantidad a medir. La magnitud de la componente aleatoria de la incertidumbre se puede determinar mediante herramientas estadísticas aplicadas a múltiples mediciones de la misma cantidad.

3. Revisión y Referenciación Internacional

Los países estudiados y referenciados en esta sección fueron seleccionados por el CNO por su alto porcentaje de energía hidroeléctrica en la composición de su matriz de generación.

3.1. Brasil - ONS

El Sistema Interconectado Nacional - SIN es un sistema para la producción y transmisión de energía eléctrica principalmente basado en centrales hidroeléctricas y plantas térmicas. La operación de SIN involucra complejos modelos de simulación que están bajo la coordinación y control del Operador del Sistema Eléctrico Nacional - ONS, que a su vez, es inspeccionado y regulado por la Agencia Nacional de Energía Eléctrica - ANEEL.

La operación hidráulica de los sistemas de embalses que forman parte del SIN es una actividad en tiempo real que consiste en la puesta en operación de las pautas hidráulicas que, utilizando la capacidad de regulación de los embalses, permite la gestión del almacenamiento de agua en los embalses, considerando la optimización energética, el control de inundaciones y atender los múltiples usos del agua [29].

El ONS es el organismo responsable de coordinar y controlar la operación de las instalaciones de generación y transmisión de energía eléctrica en el SIN y de planificar la operación de los sistemas aislados del país, bajo la supervisión y Reglamento de la ANEEL.

El ONS es responsable de proponer reglas para la operación de las instalaciones de transmisión en la red básica del SIN, a ser aprobadas por ANEEL. Estas reglas se consolidan en los *Procedimientos de la Red*, que son documentos normativos elaborados por el ONS, con la participación de los agentes que lo conforman. Los Procedimientos de Red establecen los requisitos técnicos necesarios para garantizar el libre acceso a las instalaciones de transmisión, la realización de las actividades de planificación y programación de la operación electroenergética, administración de los servicios de transmisión de energía eléctrica, propuesta de ampliaciones y refuerzos de la red, así como las actividades de supervisión, coordinación y control del funcionamiento del sistema [30].

Los Procedimientos de Red vigentes están divididos en 24 módulos según su temática. El *Módulo 9 - Recursos hídricos y meteorología* se ocupa de establecer las responsabilidades y procesos para la obtención de los insumos para la planificación y programación de la operación del SIN, en cuanto a

información y datos hidrológicos, hidroenergéticos y meteorológicos, datos técnicos y restricciones hidráulicas de las centrales hidroeléctricas, así como requisitos para la operación de control de inundaciones de los embalses de las plantas.

Los estudios de recursos hídricos y meteorología tratados en el *Módulo 9 - Recursos hídricos y meteorología* dan apoyo a las actividades relacionados con las funciones de planificación de la operación energética a mediano plazo y programación electroenergética semanal y diaria. También soportan las funciones de pre-operación, tiempo real y post-operación [31].

Los datos hidroenergéticos que son monitoreados por el ONS incluyen los datos hidráulicos, relacionados con los niveles y volúmenes en los embalses y los caudales en los sitios de uso y en los puntos de interés de la operación del SIN, tales como estaciones fluviométricas y captaciones de agua significativas en la cuenca, los datos hidrológicos relativos a flujos naturales incrementales y flujos naturales totales, y datos de energía, relacionados con Energía Natural Afluyente - ENA y Energía Almacenada - EAR [32].

El submódulo 9.2 asigna las responsabilidades relacionadas con el monitoreo, análisis y tratamiento de los datos hidroenergéticos del SIN y establece el proceso de consistencia y consolidación de esos datos para poner a disposición la información hidroenergética necesaria para las actividades de planificación, programación y operación del SIN.

El ONS tiene la responsabilidad de monitorear, analizar y tratar los datos hidroenergéticos del SIN.

En el caso de proyectos en estado de planeación próximos a entrar en operación, el ONS es el encargado de constituir un grupo de trabajo con la ANEEL y los agentes responsables con el objetivo de obtener las series históricas de caudales naturales totales mensuales [32]. También se encargan de solicitar a los agentes de generación las series históricas de promedios diarios de los caudales naturales de nuevos recursos que serán integrados al SIN. Durante el llenado de nuevos embalses deben solicitar a los agentes generadores los datos hidráulicos necesarios para monitorear el proceso.

El ONS solicita a los agentes de generación, Agencia Nacional de Agua - ANA y otras entidades responsables de las estaciones fluviométricas información sobre las redes fluviométricas disponibles. Solicita a los agentes de generación, ANA y otras entidades el suministro de datos sobre estaciones fluviométricas de interés para el monitoreo, análisis y tratamiento de datos hidroenergéticos. Luego analiza la red fluviométrica disponible y, de ser necesario, propone a la ANEEL y la ANA la instalación de nuevas estaciones y la implantación de nuevos sensores y sistemas de transmisión de datos en tiempo real en las estaciones existentes, según sea necesario [32]. También es el encargado de establecer y proporcionar a los agentes de generación el tipo, formato, periodicidad y plazos para el envío de datos de las estaciones fluviométricas de interés.

Solicita a los agentes de generación información que sustente la definición y aplicación de metodologías para la verificación y consolidación de datos hidroenergéticos, para la reconstitución de

caudales naturales, para el cálculo de series de caudales de estaciones artificiales y para el cálculo de ENA y EAR.

En el Manual de Procedimientos de Operación - MPO, Módulo 10 - Submódulo 10.22 se establecen los procedimientos para el cálculo de los datos hidráulicos, hidrológicos e hidroenergéticos relacionados con los embalses de las centrales hidráulicas despachadas por el ONS.

Los agentes de generación son responsables de instalar los instrumentos de medición para obtener y transmitir la información a los centros de operación designados por el ONS. De igual manera son responsables por garantizar la calidad de los datos de los embalses enviados a el ONS [33]. El ONS hace uso de los datos horarios para: agregación en bases de datos temporales y espaciales, producción de otras cantidades, estudio de la coherencia de datos diarios y las simulaciones [34].

Para el seguimiento hidrológico se deben obtener los siguientes datos y transmitirlos al centro de operación del ONS de la zona [33]:

- a. Nivel del embalse en metros sobre el nivel del mar [m]
- b. Nivel del canal de fuga en metros sobre el nivel del mar [m]
- c. Caudal descargado por la turbina [m^3/s]
- d. Caudal de vertimiento [m^3/s]
- e. Caudal de otras estructuras (caudal devuelto al río aguas abajo de la explotación a través de esclusas, escalas para peces y descarga de fondo, este último cuando se utiliza con un objetivo diferente de control de niveles e inundaciones) [m^3/s]
- f. Caudal transferido a otros embalses [m^3/s]
- g. Caudal afluente¹ [m^3/s]

Los datos son enviados a la ONS a través del Sistema de Supervisión y Control - SSC (Sistemas de Supervisão e Controle) en resolución horaria. La Gerência de Recursos Hídricos e Meteorologia del ONS realiza un proceso de revisión de la consistencia de los datos en tres niveles:

- La consistencia de primer nivel se aplica sobre los datos horarios y diarios y tiene como objetivo identificar datos con posibles errores. El proceso se realiza mediante la aplicación de filtros y balances. Por ejemplo, el nivel del agua del embalse debe estar entre los valores mínimos y máximos operativos salvo en situaciones excepcionales, la tasa de variación diaria del nivel del agua del embalse debe estar dentro de un rango predefinido para el mismo, el caudal turbinado debe ser compatible con la generación y el caudal afluente debe ser compatible con el valor calculado mediante el método de balance hídrico [35].
- La consistencia de segundo nivel se realiza en conjunto con los respectivos agentes teniendo en cuenta los siguientes puntos focales: (1) datos operativos consistentes y coherentes con los resultados de la operación; (2) eliminación de flujos incrementales negativos, mediante la

¹El caudal afluente del embalse es el proveniente de la propia cuenca en el sitio de uso, calculado por balance hidráulico como se explica en el Manual de Procedimientos da Operação [34].

aplicación de medias móviles y la agrupación de subcuencas; (3) eliminación de datos con errores graves identificados por el análisis de consistencia de primer nivel u otros errores identificados posteriormente. Los datos resultantes de la consistencia de segundo nivel se almacenan con la indicación de “Datos Consistentes” en la base de datos.

- La consistencia de tercer nivel también se realiza en conjunto con los agentes e incluye el análisis de series hidrológicas con la agregación de información de estaciones hidrométricas para identificar distorsiones en valores e incompatibilidades con la naturaleza de las cuencas. En esta consistencia, los datos operativos hidráulicos se reevalúan para mantener su armonía con los datos hidrológicos. Los datos resultantes de esta coherencia se almacenan en la base de datos con la indicación “Datos consolidados”.

La revisión de consistencia en tres niveles se realiza diariamente [34].

La Gerencia de Recursos hídricos y meteorología de la ONS genera los datos hidrológicos e hidroenergéticos diarios a partir de los datos hidráulicos en base horaria suministrados por los agentes. Los datos diarios se obtiene mediante la media aritmética de los datos horarios en todos los casos excepto el nivel del embalse para el que se usa el valor a las 24 h [34].

Los datos hidráulicos, hidrológicos e hidroenergéticos grabados en la base de datos se publican en la página del ONS para consulta pública.

La Agencia Nacional de Aguas - ANA es la encargada de la regulación, planeamiento, supervisión y aplicación de las leyes asociadas a las políticas nacionales de recursos hídricos en Brasil. La ANA define las reglas para el funcionamiento de los embalses del país y monitorea, a través del nivel del agua, los caudales diarios de afluentes (el volumen de agua que ingresa al embalse por día) y efluentes (el volumen de agua que sale). El Sistema de Monitoreo de Embalses (SAR) es otra herramienta utilizada por ANA, que permite monitorear datos sobre el funcionamiento de algunos de los principales embalses del país [36]. Lanzado oficialmente en 2014, el SAR consiste en una plataforma web que permite, de forma sencilla, el seguimiento del funcionamiento de los principales embalses de Brasil. Se divide en tres módulos, uno de los cuales está dedicado al SIN [37].

La Resolución Conjunta de la Agencia Nacional de Agua - ANA y ANEEL número 03, del 10 de agosto de 2010 [38], establece las “condiciones y procedimientos a observar por parte de los agentes generadores de energía para la instalación, operación y mantenimientos de estaciones hidrométricas destinadas al monitoreo de variables pluviométricas (precipitación), limnimétricas (nivel del embalse), fluviométricas (nivel de río y caudal con base a la curva nivel - caudal), sedimentológicas y de calidad del agua” [39].

En dicha Resolución se establecen el número de estaciones de cada tipo que el Agente Generador debe instalar como función del área de la cuenca, La fig.1 muestra el número de estaciones requeridas. Todas las estaciones hidrométricas con monitoreo pluviométrico, limnimétrico y pluviométrico deben ser automatizadas y tener capacidad de transmisión remota. La información recolectada

debe registrarse con un intervalo horario, o menos, con disponibilidad horaria a ANA, a través de servicios de transferencia vía internet en el formato y dirección que indicado por la ANA.

Tipo de Monitoreo	Área de Drenagem Incremental				
	De 0 a 500 km ²	De 501 a 5.000 km ²	De 5.001 a 50.000 km ²	De 50.001 a 500.000 km ²	Acima de 500.000 km ²
Pluviométrico	1	3	4	6	7
Limnimétrico	1	1	1	1	1
Fluviométrico	1	3	4	6	7
Sedimentométrico	1	2	2	3	3

Figura 1: Número de estaciones por tipo y área de la cuenca. Tomado de [38].

También se establece que en las secciones de las estaciones de medición se deben realizar por lo menos cuatro (4) aforos líquidos anuales para actualizar las curvas de gasto. Se estandarizan los procedimientos para los aforos. Si bien se describen los diferentes métodos posibles para realizar dichos aforos, recomiendan la utilización de métodos acústicos. Se establece que los instrumentos para la realización de los aforos deben calibrarse cada año.

Con el propósito de guiar a los agentes generadores y estandarizar la operación y mantenimiento de las estaciones hidrométricas la ANA publicó el documento *ORIENTAÇÕES PARA OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS* [39]. Dicho documento detalla los procedimientos que deben ser seguidos para el mantenimiento de los equipos en los puntos de monitoreo, así como las actividades de operación y los procedimientos que deben ser realizados de mediciones de caudal, sedimentos y calidad del agua. El documento establece los requisitos básicos de los instrumentos de medición de los que consisten las estaciones hidrométricas. Específicamente con respecto a los pluviómetros establece que de cumplir con las siguientes características técnicas:

- Área del orificio de captación de agua entre 200 y 500 cm²
- Resolución igual o inferior a 0,35 mm
- Rango de medición: 0 a 200 mm/hora
- Exactitud: $\pm 3\%$ para precipitaciones de hasta 50 mm/hr
- Exactitud: $\pm 5\%$ para precipitaciones por encima de 50 mm/hr
- Condiciones ambientales de operación:
 - Temperatura: -10°C a +55°C
 - Humedad Relativa: 0 % hasta 100 %

En cuanto a los sensores de nivel establece que los instrumentos deben tener como mínimo las siguientes características técnicas:

- Resolución: igual o inferior a 5 mm
- Rango de medición (m): de acuerdo a la variación del nivel del cuerpo de agua

- Exactitud: ± 1 cm para cuerpos de agua con un rango de variación del nivel máximo de 10 metros
- Exactitud: 0,1 % del rango de variación máxima para cuerpos de agua con un rango de variación del nivel por encima de 10 metros

También se establece la obligatoriedad de la transmisión de los datos de lluvia, nivel y caudal, con base al nivel y la curva nivel - caudal, en tiempo real cada hora al servidor del sistema de recepción de datos de la ANA.

3.2. Mercado Nord Pool

Suecia tiene un consumo de electricidad de 15.000 kWh por habitante por año, el cuarto más alto del mundo, solo detrás de Noruega, Canadá e Islandia. Este alto consumo es debido principalmente al clima frío y el sector industrial [40].

Noruega fue el primer país Nórdico en desregular su mercado de electricidad en 1991. En 1992 Statnett se estableció como el operador del sistema de transmisión. En 1993 Statnett estableció Statnett Marked, la primer bolsa de energía en Noruega e hizo posible que los consumidores en el país escogieran su propio proveedor de energía.

Suecia dio su primer paso hacia la desregulación en 1993 cuando se estableció Svenka Kraftnät, de propiedad del estado para manejar la red eléctrica así como las interconexiones internacionales. Desde el 1 de enero de 1996, el mercado Sueco también se desreguló y pronto después Svenska Kraftnät y Statnett Marked se unieron para formar Nord Pool de propiedad de las dos empresas.

Finlandia se unió a la bolsa de energía Nórdica en 1998, siendo el tercer país en hacerlo. No fue sino hasta el año 2000 que todos los países Nórdico hicieron parte de la bolsa de energía cuando Dinamarca del Este se unió, Dinamarca occidental lo había hecho en 1999. En la actualidad no solo los países Nórdicos hacen parte de la bolsa de energía Nórdica también negocian energía Gran Bretaña, Alemania, Bélgica, Estados Unidos, Suiza, Italia y Holanda.

Nord Pool es la bolsa de energía donde se realizan las transacciones del mercado Nordico. Para las personas que negocian en los mercados de futuros energéticos, puede ser útil conocer la cantidad de agua que entra en una represa de una planta de generación hidráulica cada semana ya que esta cantidad influenciará el precio de la electricidad. Siendo este más económico cuando hay abundancia de agua y más costoso en la situación opuesta. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los precios de la energía están regulados dentro de los países.

Nord Pool consiste de dos mercados, el mercado financiero y el mercado spot.

En el mercado spot, Elspot, los inversionistas pueden comprar y vender potencia física con contratos horarios para el siguiente día. Los precios están calculados para Elspot con base al balance entre las ofertas y subastas de todos los participantes activos en el mercado.

El mercado de energía Nórdico tiene muchas ventajas ya que las plantas de generación en los países integrados se pueden utilizar de una mejor manera tanto económica como ambientalmente. La razón de esto es que las plantas que tienen un bajo costo variable para la producción de electricidad (costo de combustible, operación, mantenimiento, impuestos, tarifas) tales como las hidroeléctricas y las nucleares se usan antes que las plantas con costos de operación más altos. Si la producción a partir de energía hidráulica es suficiente para cubrir la demanda, ninguna otra planta se utiliza ya que ésta es la más económica y la más ambientalmente amigable.

El mercado spot está íntimamente asociado a la disponibilidad de agua así como a la demanda de electricidad.

Cada miércoles a la 1 pm, *Svensk Energi*, el gremio de los productores de energía de Suecia, publican la cantidad de agua en términos de energía afluente a los embalses de las centrales hidroeléctricas en Suecia correspondiente a la semana anterior. La información correspondiente para las plantas de Noruega son publicadas por el Directorado Noruego de Recursos Hídricos y Energía - NVE (*The Norwegian Water Resources and Energy Directorate*) también los miércoles.

En Suecia, los picos de flujo afluente ocurren durante la primavera cuando la nieve se empieza derretir. Otro pico ocurre en otoño, cuando la lluvia es abundante. La situación en Noruega es similar, excepto por los arroyos que son alimentados por los glaciares. En este caso, el aumento en la escorrentía comienza durante la primavera, al tiempo que la nieve se derrite. La diferencia radica en que los glaciares continúan alimentando agua a las corrientes hasta el otoño cuando el clima se hace más frío y los glaciares se congelan. Las empresas de generación hidroeléctrica tratan de administrar sus plantas de manera que puedan almacenar agua en los embalses en periodos de alto flujo y extraerla durante el invierno, cuando la demanda, así como los precios son más altos.

En las siguientes secciones se exponen algunos detalles sobre los procesos de medición de las variables hidrológicas en Suecia y Noruega.

3.2.1. Suecia

El Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco - SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) tiene la misión de proveer información referente al agua y al clima para los sectores público y privado en Suecia [41]. Dentro del campo de la hidrología hacen observaciones del nivel y caudal de agua en todo el país.

La red hidrológica del SMHI consiste de cerca de 320 estaciones de aforo. Además reciben datos hidrológicos de otras 20 estaciones de las cuales son copropietarios y de 80 estaciones de propiedad de las centrales de generación hidráulica [41]. En las estaciones de aforo el nivel se mide de manera continua. Cada estación tiene una curva de gasto para estimar el caudal con base a las mediciones de altura. La información se recolecta en tiempo real en 70 estaciones. En las estaciones restantes,

los datos son recolectados y digitalizados mensualmente. *Los datos se usan principalmente para calibrar los modelos hidrológicos del SMHI.* Las estaciones se inspeccionan cada dos años o con mayor frecuencia de ser necesario. Durante la inspección se asegura el correcto funcionamiento de los instrumentos de aforo y se verifica la curva de gasto.

En Suecia la ley establece los límites superiores e inferiores a los niveles de agua en los ríos, lagos o embalses regulados. Estos límites generalmente están especificados al centímetro y varía a lo largo del año [42].

Siguiendo las recomendaciones de la WMO, en Suecia los datos de nivel utilizados para calcular caudal deben tener un nivel de precisión de 3 mm o 0.2 % de el nivel efectivo [41].

Si bien la red hidrométrica Sueca es amplia y la información está centralizada, algunos de los actores asociados al uso del agua también realizan sus propias mediciones. Enjebo [41] realiza un inventario de las mediciones hidrológicas que realizan los diferentes actores en Suecia. La metodología consistió en encuestar a los diferentes entes y agentes con derechos e intereses en el uso de agua. En el estudio se determinó que de las compañías generadoras de energía hidroeléctrica consultadas 19 respondieron la encuesta, 9 de las cuales no realizan ningún tipo de medición. Entre los que si miden, las razones para realizar las mediciones se pueden dividir en dos categorías: reactiva y proactiva. Las mediciones que se realizan para mantener los niveles dentro de ciertos límites, son reacciones a mandatos legales. Las razones proactivas incluyen el control de inundaciones y mejoramiento del aprovechamiento del agua. En el caso de las hidroeléctricas, el efectivo control de la planta es la principal razón para realizar mediciones.

Un ejemplo de una empresa que realiza mediciones hidrométricas muy completas es *Karlskoga Energi*, una compañía hidroeléctrica que cuenta con 58 puntos de medición. La principal razón para realizar las mediciones es que tales compañías cuentan con un otorgamiento del derecho al uso del agua que les obliga realizar las mediciones.

Las técnicas para la medición del nivel se dividen en tres grupos: medición con registro continuo, sin registro continuo y técnicas temporales o simples. La mayoría de las mediciones se realizan con técnicas de medición con registro continuo y lo más común es usar sensores de presión. Entre los sitios que utilizan este tipo de sensores la exactitud que se maneja varía desde 1 mm hasta 5 cm, siendo la más común 1 cm.

Las compañías hidroeléctricas que realizan mediciones calculan la descarga con base a la producción, la posición de las compuertas o el nivel de agua.

En conclusión, a partir de las referencias encontradas, se puede establecer que Suecia cuenta con una red la red hidrológica del SMHI, la cual realiza mediciones de todas las variables de interés para múltiples aplicaciones. De igual manera, algunos de los operadores de centrales hidroeléctricas cuentan con estaciones de medición que les permite optimizar la operación de la planta y, en algunos casos, cumplir con requerimientos regulatorios.

3.2.2. Noruega

En Noruega el marco legal para el sector energético busca asegurar el manejo efectivo de los recursos, la seguridad energética y un mercado energético funcional [43]. Se destacan dentro de la legislación la ley de derecho a las caídas de agua (*Waterfall Rights Act*) y la ley de regulación de los cauces de agua (*Watercourse Regulation Act*). El primero establece que solo se otorgan licencias de operación de dicho recurso a organismos públicos y a compañías de por lo menos dos tercios propiedad pública. El segundo establece los límites superiores e inferiores permitidos para los niveles de agua en los embalses, también establece mínimos flujos permitidos aguas abajo del embalse y los volúmenes de agua que son permitidos durante varios momentos del año.

El Directorado Noruego de Recursos Hídricos y Energéticos - NVE (Norwegian Water Resources and Energy Directorate) tiene la responsabilidad de la hidrología en Noruega. Maneja la red de observación hidrológica y bases de datos (HYDRA II) [44]. En Noruega, NVE es el representante para hidrología ante la WMO y es miembro del *European Avalanche Warning Services* - EAWS y el representante del *World Glacier Monitoring Service* - (WGMS).

El NVE mantiene registros de largo plazo de observaciones hidrológicas. La red de observaciones hidrológicas cubren toda la fase en tierra del ciclo de agua y principalmente los siguientes parámetros: niveles de agua y caudales, temperatura del agua, hielo en lagos y ríos, transporte de sedimentos, equivalente en agua y profundidad de la nieve, balance de masa de los glaciares, humedad del suelo y agua subterránea. La red de estaciones hidrológicas consiste de aproximadamente 500 estaciones, distribuidas en cuerpos de agua en todo el país. Las estaciones están instrumentadas para registrar y almacenar los datos *por lo menos cada hora* [45].

De las 500 estaciones meteorológicas aproximadamente 200 son de propiedad de NVE y las restantes 300 son principalmente de propiedad de los reguladores. Los datos de la mayoría de las estaciones son transmitidas vía celular o telefonía satelital. Un gran número de estaciones están disponibles en la página web de la NVE. Esto hace posible, por ejemplo, conocer los flujos en los correspondientes correspondientes cauces en tiempo real. Los datos se actualizan en la medida que llegan a los servidores de la NVE.

Los niveles de agua recolectados se convierten en caudal mediante las curvas nivel - caudal correspondiente a cada río. La fig.2 muestra una estación para la medición de nivel de agua. Dentro de la cabina se encuentra un pozo conectado a través de tubería al río. Dicho pozo está instrumentado con equipo para la medición, registro y transmisión de datos. La fig.3 muestra otro tipo de estación con la instrumentación ubicada directamente en el río.



Figura 2: Estación de aforo de caudal en cabina [45]



Figura 3: Estación de aforo de caudal tipo mástil [45]

Existen varias técnicas para la medición del caudal con el propósito de desarrollar la curva nivel - caudal de un río. El método a utilizar dependerá de la naturaleza física de cada río. A continuación

se mencionan algunos de los métodos utilizados por la NVE [46].

Se realizan mínimo entre 12 y 20 aforos por estación por año, incluyendo condiciones de bajo y alto nivel de agua. Con el fin de aforar el caudal la NVE utiliza diferentes métodos, que varían dependiendo de factores tales como el tamaño del río, las características hidráulicas y el caudal. El instrumento más común para la realización de los aforos es el Perfilador de Corriente Acústico Doppler - ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). La NVE cuenta con equipos de este tipo tanto para ríos pequeños como grandes.

En algunos casos la NVE también utiliza el método de trazadores para el aforo de caudal en ríos especialmente turbulentos con altas rugosidades de suelo. Bajo estas condiciones otros métodos pueden ser difíciles o incluso imposibles de utilizar. En algunos casos se utiliza algún tipo de tinte (uranio o rodamina) en lugar de sal. Cuando se disuelven en el agua el agua se torna verde y puede ser detectada con sensores. Este tipo de mediciones corresponden al 30 % de las mediciones de caudal en Noruega.

Finalmente, el método de los molinetes también es utilizado para la determinación de caudal. Se especifican entre 10 y 20 verticales a lo ancho de un cauce. Hasta la década anterior este era el método más usado para la medición del caudal. Sin embargo, su utilización ha venido disminuyendo por el alto tiempo requerido para su ejecución y las características especiales para el desarrollo de la prueba.

3.3. Canada

El Servicio Meteorológico de Canada (*Meteorological Service of Canada*) establece los estándares para el desarrollo monitoreo y reporte de las unidades de medición de datos meteorológicos en el país. Estos incluyen el Servicio Nacional de Hidrología (National Hydrological Service - NHS) que provee esta información en colaboración diferentes entidades en las diferentes provincias. Los datos incluyen información en casi tiempo real 24 horas al día, 365 días al año, así como información histórica e información estadística [47]. La información se usa para control de riesgo de inundación, respuesta a emergencias, planeación de los recursos, asignación del recurso, planeación y diseño de infraestructura, monitoreo y manejo ambiental, análisis del cambio climático y efectos climáticos de largo plazo, generación de energía y usos recreativos [48].

El Servicio Nacional de Hidrología - NHS (*National Hydrological Service*) se encarga principalmente de la medición de los niveles de agua, estimación de los caudales y la publicación de los datos y la información hidrométrica. El NHS representa un ejemplo de la colaboración entre el gobierno federal y los gobiernos de las provincias. La red de estaciones hidrométricas para la medición de los niveles de agua y los caudales es manejada y mantenida mediante acuerdos entre el ministerio de Ambiente de Canada y las autoridades provinciales o territoriales del país. En general la red

es operada por el ministerio de ambiente, excepto en Quebec donde opera de manera autónoma [49].

En Canadá la información hidrométrica es recolectada y compilada por las ocho oficinas del Servicio de Agua de Canada (Water Survey of Canada). La red cuenta con más de 7700 estaciones hidrométricas de las cuales más de 1900 suministra información en tiempo real. La información se guarda en dos bases de datos centralizadas: HYDEX y HYDAT [50].

HYDEX es una base de datos relacional que contiene el inventario de las estaciones para la medición de caudales, niveles de agua y sedimentación disponibles en Canada. Esta base de datos a su vez contiene información sobre la localización, equipos y tipos de datos recolectados en cada estación.

HYDAT es una base de datos relacional que contiene los datos obtenidos por las estaciones listadas en HYDEX. Estos datos incluyen valores diarios de caudales, niveles de agua y concentración de sedimentos.

En general, la información en los servicios de información cuenta con registros en base horaria.

Los caudales en la red de monitoreo no se miden de manera directa. En cada estación, los niveles de agua se registran de manera continua en forma digital mediante el uso de sensores de nivel conectados a sistemas automáticos de adquisición y registro de datos. Los datos continuos de nivel se usan para determinar el caudal de manera continua a través de las curvas de nivel - caudal [51].

Los datos hidrométricos son recolectados, interpretados y diseminados por el *Water Survey of Canada* - WSC en asocio con las provincias, territorios y otras agencias a través del Programa Nacional de Hidrología. Para el desarrollo de las curvas de nivel - caudal, el WSC visita cada estación varias veces en el año para tomar mediciones directas de caudal y nivel del agua. Los equipos y métodos varían dependiendo de las condiciones físicas, el tamaño del río y otros factores.

Específicamente para la medición del nivel de agua el Ministerio de Ambiente (*Environment Canada*) publicó el *Hydrometric Field Manual - Measurement of Stage* [52] donde se estandarizan los principales métodos para la medición de esta variable.

El *Hydrometric Manual - Data Computations* [53] estandariza muchos de los procesos asociados a la medición, registro, validación, ajuste y transmisión de la información hidrológica. También incluye los procedimientos para el desarrollo de curvas de nivel - caudal, así como la verificación de la calidad de los datos y la interfaz con las bases de datos del país. También se definen la precisión y cifras significativas de las principales variables a medir así:

- Nivel de agua: Observación - 0.002 m, Cálculos y publicación - 0.001 m.
- Ancho del río: Expresado en kilómetros (km) con tres cifras significativas pero no más de un puesto decimal.
- Velocidad del Agua: En metros por segundo (m/s) con tres cifras significativas pero no más de tres puestos decimales.

- Area transversal: En metros cuadrados (m^2) con tres cifras significativas pero no más de dos puestos decimales.
- Caudal: Metros cúbicos por segundo (m^3/s) con tres cifras significativas pero no más de tres puestos decimales.
- Temperatura del agua: 0.5°C

3.3.1. Quebec

En Quebec, el Ministerio de la Lucha Contra los Cambios Climáticos - MELCC (*Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*) es el encargado de gestionar y operar las represas en Quebec. De las 760 represas de las que es responsable el ministerio, solo 17 tienen acuerdos vigentes para el cobro de servicios de almacenamiento, principalmente con los productores hidroeléctricos.

Con el objetivo de garantizar la gestión tanto cualitativa como cuantitativa del agua el MELCC cuenta con una red hidrométrica que opera más de 230 estaciones hidrométricas a través del *Quebec Water Expertise Centre* [54]. La red monitorea continuamente los caudales y los niveles de los ríos y embalses. Más de 205 de las estaciones transmiten los datos registrados cada **15 minutos** por los instrumentos de medición, ya sea por un enlace telefónico, celular o satelital a un sistema integrado de recolección de datos telemedidos, cada hora. Las estaciones transmiten datos de forma continua, las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

Quebec, a diferencia de las demás provincias de Canadá, es autónomo en el funcionamiento de su red hidrométrica. En la página del MELCC, se expone como Quebec reconoce [54] que el acceso a información confiable sobre el estado y evolución de los recursos hídricos juega un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico de la provincia. El acceso a esta información también ayuda a mantener un umbral adecuado de calidad ambiental, basado en un buen conocimiento de los procesos físicos que rigen el ciclo hidrológico en el tiempo y el espacio. Casi todos los diferentes sectores de la economía de la provincia necesitan información sobre el agua para cumplir con sus requisitos de planificación y desarrollo y para llevar a cabo sus actividades.

Los niveles y nivel de vertimientos permitido son establecidos por los administradores del embalse, generalmente el MELCC, de acuerdo con las diversas limitaciones de los planes de gestión de la represa. Los modelos hidráulicos determinan las fluctuaciones en los caudales y niveles de los ríos correspondientes a las entradas o salidas esperadas de las presas.

Hydro-Quebec, de propiedad y operado por la provincia de Quebec, es el principal generador, transportados y distribuidor de energía en la provincia de Quebec. Fue fundada en 1944 tras la nacionalización de Montreal Light, Heat and Power [55]. Hydro-Quebec tiene 27 embalses de agua propios, con una capacidad para almacenar 176.000 millones de kWh.

La operación del sistema de generación de Hydro-Quebec se hace con base a los estándares establecidos por el *North American Electric Reliability Corporation* (NERC) y el *Northeast Power Coordinating Council* (NPCC).

Desde la década pasada Hydro-Quebec, con la intención de optimizar el desempeño de las plantas de generación hidráulicas han venido implementando metodologías para el monitoreo continuo del caudal de descarga en las turbinas. Con este propósito se han implementado métodos basados en la medición de la caída de presión [56] y en métodos acústicos [57], entre otros.

El Ministerio de la Energía y los Recursos Naturales (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles) - MERN es el encargado de administrar los recursos y la tierra en Quebec. Dentro de los requerimientos ambientales a los que están sujetos los proyectos de generación hidroeléctrica se incluyen:

- Mantener una reserva de flujo aguas abajo de los embalses
- Mantener un nivel de agua en los embalses que tenga en consideración varios tipos de uso en consideración,
- Desarrollo de ubicaciones para el desarrollo de peces y humedales que permitan la vida de la fauna silvestre,
- Construcción de rampas para el atracamiento de botes.

Quebec basa un gran porcentaje de su crecimiento económico y actividades en el sector energético en el desarrollo de sus recursos hídricos. Quebec es el mayor productor de energía en Canada. También tiene una de las centrales de generación hidráulica más grandes del mundo: el complejo La Grande en el sector Baie James en la región Nord-du-Quebec.

El documento *Technical Requirements for the Connection of Generating Stations to the Hydro-Québec Transmission System* [58] establece que los propietarios de centrales hidroeléctricas de más de 50 MW deben suministrar en tiempo real al operador de la red los niveles del embalse y el canal de descarga.

3.3.2. British Columbia

En la provincia de British Columbia BC Hydro, de propiedad del gobierno y la gente de la provincia, es el principal generador, transportador y generador de energía en esa provincia. El grupo de hidrología de BC Hydro tiene más de 150 estaciones automatizadas, con reporte en tiempo real, para la caracterización de las condiciones del agua superficial [59].

En 1998 la provincia de British Columbia emitió las Guías para el Plan del Uso del Agua - WUPs (*Water Use Plan Guidelines*) con el objetivo de mejorar el fin de encontrar un mejor balance entre los diferentes usos del agua, entre ellos, la generación hidroeléctrica [60]. Entre lo establecido en el WUPs, BC Hydro requirió incrementar los flujos y elevación de los embalses, mejorar las

características para la recreación y hábitat en los embalses y desarrollar estudios de monitoreo del medio ambiente. Las WUPs establecieron cerca de 750 restricciones a la operación de las plantas de generación y embalses, incluyendo flujos mínimos, objetivos de los niveles de los embalses según la estación, y límites a las variaciones de los caudales aguas abajo.

En BC los datos hidrométricos se recogen de acuerdo al BC Hydrometric Standards (2009 RISC Standards) [61]. Estos estándares fueron desarrollados para complementar los estándares del Water Survey Canada - WSC. Sin embargo, el ministerio de ambiente de BC ha identificado que el 2009 RISC no incluye los equipos y software actualmente aceptados en la industria [62]. Se está en el proceso de actualizar dicho estándar de manera que esté alineado con las mejores prácticas en la industria.

En el manual se establecen las técnicas para el establecimiento de estaciones para la medición del nivel en ríos y posterior aforo del caudal mediante instrumentos mecánicos o acústicos. También establece procedimientos para el uso de estructuras hidráulicas calibradas. Se menciona que se recomienda realizar un mínimo de 10 mediciones de caudal, cubriendo todo el rango hidráulico del río.

3.4. Austria

En Austria La generación hidráulica (incluyendo acumulación por bombeo) representa más de dos tercios de la generación total de energía, de la cual el 23 % corresponde a seguimiento de picos lo que favorece la integración de otras energías renovables [eurelectric].

El trabajo hidrológico en el país se centra en la adquisición de los parámetros que permitan describir la constitución y forma de los cauces y los procesos dinámicos de los cuerpos de agua [63].

Para el levantamiento batimétrico de los lechos de los cauces se utilizan principalmente sistemas móviles de tipo acústicos de un solo haz o multihaz. Este último se utiliza en aplicaciones en las que se necesita un mayor nivel de detalle. Para determinar el posicionamiento se utilizan equipos GPS, el más avanzado de los que se usan en la actualidad es el Leica GPS1200+ (con Glonass) el cual permite una mayor precisión [63].

Para las mediciones batimétricas, se permiten errores de ± 0.05 m (más un error proporcional a la profundidad) para las mediciones de profundidad y ± 0.20 m para el posicionamiento.

Para las mediciones de caudal se utiliza principalmente equipos ADCP desde una embarcación. Solo en algunos casos, como en inundaciones severas, se utilizan correntómetros de molinetes desde puentes. Se realizan mediciones mensuales en ciertas secciones transversales estándar, en otras se realizan cuatro mediciones al año.

3.5. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM publicó en 2007 el documento *Protocolo Para el Monitoreo y Seguimiento del Agua* con el propósito de “estandarizar y homogeneizar los procesamientos con los cuales se produce el dato y se genera la información hidrológica” [64]. El documento fue actualizado en 2017 con *Protocolo de Monitoreo de Agua* [27], el cual tiene como objetivo orientar en la realización de prácticas hidrológicas de monitoreo. El documento no solo recoge los métodos y prácticas recomendadas por la WMO, sino que los ambienta y ejemplifica en su aplicación en el contexto del país.

El IDEAM opera dos tipos de estaciones hidrológicas en Colombia: la red básica nacional con fines de estudios con proyecciones anuales y multianuales (a largo plazo) y la red básica específica nacional con fines de pronósticos hidrológicos y alertas en tiempo real por crecidas y sequías hidrológicas; ambas soportan decisiones a nivel nacional.

En 2017 el IDEAM contaba con una red básica nacional de 2639 estaciones hidrometeorológicas activas, compuesta por 711 estaciones hidrológicas 1287 pluviométricas y 641 climatológicas [27]. Estas estaciones cuentan con registros convencionales (cerca del 90 % son estaciones convencionales), sin embargo, en los últimos años esta red ha venido adquiriendo equipos automáticos que permiten registros de mayor calidad y en tiempo real.

El documento *METODOLOGÍA PARA REALIZAR TRABAJOS DE HIDROTOPOGRAFÍA* del IDEAM [26] describe algunos lineamientos generales para realizar un levantamiento hidrotopográfico.

4. Mejores Prácticas para la Medición de Variables Hídricas de los Agentes Generadores en Colombia

En esta sección se realiza una narrativa de las mejores prácticas implementadas por los agentes generadores en Colombia con base a la documentación suministrada por los mismos Agentes para el desarrollo de este proyecto.

4.1. EPM

Esta sección está basada en el documento *Mejores Prácticas para la Medición de Variables Hídricas Operativas*, Unidad Hidrometría y Calidad Generación Energía, EPM, 2020 [65].

Para las aplicaciones de monitoreo hídrico, EPM considera las siguientes referencias:

- *Guía de prácticas hidrológicas Volumen I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica*. Organización Meteorológica Mundial. OMM-N° 168

- *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación meteorológicos*. Organización Meteorológica Mundial. OMM–N° 8.
- *Normas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) para los levantamientos Hidrográficos*. Edición 5, Publicación especial No 44. Orden Especial y 1a.
- *Standards for the Analysis and Processing of Surface Water Data and Information Using Electronic Methods*. Water Resources Investigations. Report 01–4044. USGS. 2002.
- Acuerdos CNO 1287 del 05 de marzo 2020 y 565 del 02 de febrero de 2012, con los cuales se aprueba el procedimiento para la realización de las mediciones de batimetría en los embalses de las plantas despachadas centralmente.
- Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua-capítulo II. IDEAM. 2007.
- Resolución CREG 025 del 13 de julio de 1995, por la cual se establece el código de redes, como parte del reglamento del Sistema Interconectado Nacional.
- Resolución CREG 060 del 20 de junio de 2019, por la cual se hacen modificaciones o adiciones transitorias al reglamento de operación para permitir la conexión y operación de plantas solares fotovoltaicas y eólicas en el SIN y se dictan otras disposiciones.
- Acuerdo 917 del 01 de diciembre 2016, por medio del cual se por el cual se aprueban los procedimientos para la oficialización, modificación, actualización y reporte de la información hidrológica de los ríos del SIN.

4.1.1. Nivel

Para la medición de niveles en embalses, canales y ríos se utilizan diferentes tipos de equipos. Si se cuenta con espacio para la instalación de la infraestructura necesaria para la utilización de dispositivos de no contacto de alta precisión, se favorece esta tecnología. Si no se cuenta con dicha infraestructura, se utilizan técnicas de medición de presión hidrostática.

La verificación del nivel de río, canal o embalse, se realiza comparando la medida del instrumento y la mira topográfica. La mira a su vez está referenciada respecto a un punto de referencia que se utiliza para detectar posibles desplazamientos en el soporte de las miras.

La frecuencia de mantenimiento preventivo de las estaciones de nivel de río está determinada por la cantidad de aforos de caudal que se realizan en los ríos, con el propósito de construir la curva de relación nivel-caudal o verificar la vigencia de ésta. En los períodos iniciales de operación de la estación se puede incrementar la frecuencia de realización de campañas de aforo, con el propósito de construir la curva. Debido a los principios de funcionamiento de los instrumentos de radar y flotador-contrapeso, en las visitas de mantenimiento preventivo se realizan verificaciones del nivel registrado contra la lectura en la mira topográfica, con el propósito de detectar posibles desviaciones en el registro de la variable. Debido a los principios de funcionamiento de los instrumentos, estos no requieren someterse a calibraciones periódicas.

Las estaciones de nivel de canal, debido a la geometría definida de los canales, no requieren revisión continua en búsqueda del cambio de la relación nivel-caudal. En estas estaciones se realiza una visita anual con propósitos de verificación.

Las estaciones de nivel de embalse tienen los mismos instrumentos que las estaciones de nivel de río y caudal; en este caso, las estaciones no están sujetas a verificaciones nivel-caudal, se realizan las verificaciones de nivel contra la mira topográfica anualmente. El **Cuadro 1** resume el plan de mantenimiento de las estaciones de nivel.

Cuadro 1: Frecuencia de mantenimientos en estaciones de nivel. (Adaptada de documento EPM [65]).

Tipo de Estación	Frecuencia Anual
Nivel río	4 visitas
Nivel canal	1 visita
Nivel embalse	2 visitas

4.1.2. Aportes

En EPM la determinación del aporte a los embalses se realiza con base en diversas metodologías que siguen las recomendaciones del Acuerdo CNO 917 del 01 de diciembre de 2016 como son: Factor de área, Regresión y Balance. La aplicación de una u otra metodología se define considerando los siguientes criterios:

- Factor de área: si se tiene la disponibilidad de una estación limnimétrica en la cola del embalse y la diferencia de áreas entre el sitio de la estación y el sitio de presa difieren en menos del 15 %, se puede aplicar el método de factor de área.
- Regresión: cuando se ha tenido una estación de medida en el sitio de presa operando simultáneamente con la estación en la cola del embalse durante un buen período de tiempo con ésta se puede continuar estimando el caudal en sitio de presa a partir del caudal registrado en la cola del embalse. Para la utilización de este método se consideran los criterios establecidos en el Acuerdo CNO 917 del 01 de diciembre 2016.

En la aplicación de ambas metodologías, se deben considerar las afectaciones que el caudal registrado puede tener por aportes desde y hacia otras cuencas, y este caso estos se *naturalizan* previamente.

- Balance: este método se aplica en EPM cuando no se cuenta con un sitio técnicamente adecuado para la instalación de la estación de medida cerca de la cola del embalse, también

cuando la estación disponible se localiza en un sitio muy alejado de la cola del embalse, y por lo tanto, del sitio de presa.

Aforos En los cauces naturales y en algunos canales artificiales donde se puede garantizar la relación directa del nivel con el caudal, EPM construye las curvas de calibración para estimar el caudal como función del nivel.

Para la construcción de la curva de calibración en cauces naturales se realizan los aforos necesarios para determinar el caudal correspondiente a cada nivel. Los aforos realizados son revisados siguiendo los referentes nacionales e internacionales (IDEAM, 2007; USGS, 2002). Los aforos utilizados para la construcción de las curvas contienen períodos de altos, medios y bajos de caudales. Para el rango de caudales y niveles extremos en los cuales no hay registros ni posibilidad de aforarlos, la curva se extrapola por diferentes metodologías: Método de Manning, Método de Stevens, Método de Área Velocidad, Método de Briam Chester. Varias de estas metodologías requieren para su aplicación información adicional como el levantamiento topográfico de la sección transversal donde se encuentra la estación, y la pendiente hidráulica del sitio.

Los aforos de caudal se realizan con el fin de establecer la relación directa entre el nivel y el caudal en cada estación, por lo tanto, la programación de éstos está condicionada principalmente, a la calidad de las curvas de calibración de las estaciones limnimétricas. En algunas oportunidades se realizan aforos con otros objetivos, por ejemplo, requerimientos ambientales.

En condiciones regulares se desarrolla un programa de cuatro (4) aforos por año para cada estación. EPM realiza semestralmente un análisis del estado de calibración de cada una de sus estaciones, siguiendo el procedimiento del USGS (2002) y cuando se detecta que alguna estación se encuentra descalibrada se procede a realizar un mayor número de aforos con el objeto de realizar una nueva curva de calibración.

Una estación descalibrada se identifica con la diferencia porcentual del caudal medido en cada aforo con respecto al caudal calculado. Según el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua del IDEAM la diferencia debe ser menor o igual al 10 %. Es ocasional que un aforo supere esta desviación, pero cuando esto ocurre en dos aforos consecutivos se inicia una campaña de aforos para identificar la pertinencia de cambiar la curva de calibración de la estación.

En EPM se utilizan múltiples tecnologías para realizar aforos, principalmente ADCPs y correntómetros de ultrasonido y mecánicos en los casos de fuentes más pequeñas. En casos extremos, como en las mediciones de infiltraciones, se realizan aforos volumétricos.

Para el aforo en ríos grandes se prioriza la ejecución con ADCP ya que representa una mejor precisión, disminuye el tiempo de realización, aumenta el muestreo del cauce y mejora las actividades de cálculo, sin embargo, también es posible que sea realizado con correntómetros de molinetes. Para

ríos pequeños que presentan cauces con lámina de agua baja y estrechos y no es posible utilizar el ADCP, se utilizan molinetes o un Flowtracker®.

Los referentes de la operación considerados son: 1) las prácticas de la USGS que establece los criterios para la definición de anchos de celdas y alturas y 2) las recomendaciones de operación dadas por el fabricante. El procedimiento implementado busca la obtención de valores que se encuentren dentro de un rango del 5 % de confiabilidad.

4.1.3. Caudal turbinado

Las descargas turbinadas se estiman mediante diversos equipos o procedimientos como el sensor de caudal fijo, el cual es el principal método para la medida de esta variable cuando se dispone de este equipo. Otras opciones incluyen estación limnimétrica localizada en el canal de descarga para el registro del nivel y la correspondiente curva de calibración obtenida con base en aforos. También se usa el factor de conversión, cuando no se dispone de las anteriores alternativas o sus medidas presentan fallas.

Para la instalación de medidores de caudal de ultrasonido de tránsito de tiempo, se identifica en la infraestructura de generación, sitios donde la tubería de conducción a los generadores quede expuesta. Idealmente se buscan tramos de tubería largos en los que se pueda desarrollar flujo laminar; frecuentemente, esta situación no es posible garantizarla, y es común encontrar sitios en los que la única posibilidad de instalación es en la casa de máquinas o cámaras de válvulas en las que las condiciones hidráulicas del flujo que pasa por el punto de medición no son ideales.

En el caso de los sistemas de monitoreo de caudal turbinado por medio de tecnologías de tránsito de tiempo CLAMP ON, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes, EPM verifica las mediciones comparando la energía generada contra el caudal registrado, esta medición debe estar en el rango de caudal de diseño del generador. También se hace monitoreo a las señales de calidad de los instrumentos para garantizar que el sistema de monitoreo está cumpliendo adecuadamente con su función y que la información entregada es confiable.

4.1.4. Vertimientos

Los caudales descargados por las estructuras de vertederos son estimados a partir del nivel del embalse y las curvas de calibración de dichas estructuras. En el caso de los vertederos dotados de compuertas, adicionalmente es necesario medir la apertura de estas estructuras, dado que es otra variable necesaria para la estimación del caudal.

En EPM las curvas de calibración de los vertederos están construidas en general a partir de las recomendaciones de ICOLD (International Commission on Large Dams) y el USBR (Bureau of reclamation de los Estados Unidos) para su dimensionamiento durante la etapa de diseño de la central

hidroeléctrica y son ajustadas con los modelos físicos a escala construidos durante la misma etapa. En algunos casos durante la etapa de operación se han realizado aforos de los caudales descargados lo que ha permitido realizar ajustes de la curva en el rango aforado.

En las estaciones ubicadas en canales artificiales, vertederos, y válvulas, se utilizan métodos que tienen en cuenta las características hidráulicas propias de estas estructuras para la estimación de las curvas de calibración.

Actualmente, de las 11 presas en operación consideradas como Grandes Presas por la ICOLD (por sus siglas en inglés de Comisión Internacional de Grandes Presas), solo Porce II y Porce III cuentan con compuertas para vertimientos. En general, la instalación de estos sistemas de monitoreo se realiza en la fase de construcción de la planta hidroeléctrica, y está sujeta a cambios en proyectos de actualización de los sistemas electromecánicos del sistema de compuertas. Esta instrumentación no se gestiona de manera aislada, se realiza integralmente como un sistema de monitoreo y control de compuertas de vertedero.

4.1.5. Descargas no turbinadas

Las descargas no turbinadas se estiman mediante diversos equipos o procedimientos como el caudalímetro o sensor de caudal fijo, estación limnimétrica localizada en el canal de descarga y en casos particulares como válvulas o compuertas también puede estimarse con base en la cota del embalse y el porcentaje de apertura de la válvula o de la compuerta y la curva de calibración.

4.1.6. Volumen de embalse

Cuentan con equipos especializados, basados en sondeo batimétrico multihaz, montados en una embarcación especialmente diseñada para esta función. El volumen del embalse se estima a partir de la topografía o Modelo Digital del Terreno del fondo del embalse -MDT- construido con la información batimétrica.

Con la información batimétrica se construye una tabla que se ingresa en el software de almacenamiento de información y reporte. No se utilizan ecuaciones de ajustes Nivel- Volumen- Área construidas a partir de los datos, para evitar cálculos adicionales que agreguen incertidumbre en la estimación total del volumen.

Los levantamientos batimétricos pueden complementarse con levantamientos topográficos, bajo las condiciones descritas en el Acuerdo CNO 1287 del 05 de marzo 2020. En EPM se tiene como práctica hacer el monitoreo con el embalse en su máximo nivel posible. De esta forma se favorece una navegación más segura por los distintos sectores del embalse y se protege el equipo de monitoreo de golpes con objetos localizados en el fondo. Además, se puede tener mejor calidad en la información

obtenida porque el equipo multihaz tiene mayor densidad de puntos por m² y se garantiza un mayor traslapé.

La empresa cuenta con un Plan Integrado de Pruebas de las centrales de generación de energía de EPM -PIP- para coordinar los monitoreos con los mantenimientos de las centrales, buscando con esto tener siempre el nivel de embalse máximo posible para realizar el trabajo de campo con el sistema batimétrico multihaz y el mínimo posible para el levantamiento topográfico LIDAR cuando es necesario.

La realización de las pruebas se realizan según lo establecido en el documento OHI S-44 [25] con el fin de lograr el nivel de incertidumbre requerido.

Se hace una programación de los levantamientos en un horizonte de diez (10) años, considerando para esto:

- Las vigencias de los resultados de cada embalse según los acuerdos del CNO.
- El tiempo requerido desde que inicia el levantamiento hasta la elaboración del acuerdo por parte del CNO.
- Los mantenimientos y calibraciones requeridos por los elementos que constituyen el sistema de monitoreo.
- La capacidad máxima de monitoreos al año del equipo de trabajo. Bajo esta consideración los levantamientos pueden realizarse antes de cinco (5) años, para ajustar el plan de trabajo cumpliendo con las vigencias de las batimetrías. Según el Acuerdo CNO vigente, si el resultado de una batimetría difiere en más de 1 % del valor anterior, la vigencia es de tres (3) años.

La verificación de la correcta instalación y conexión de los equipos se hace a través del software que integra la emisión de señal de cada uno de los sensores y periféricos del sistema. Allí se identifica la integración y funcionamiento de todos los equipos. Posteriormente, siguiendo los procedimientos establecidos por el fabricante se hace una calibración previa al levantamiento batimétrico donde se realiza la compensación de los movimientos de la embarcación.

4.1.7. Precipitación

A partir de la identificación de la zona general de medición, se localiza el sitio que permita tener mejor representatividad del área de interés. Se busca una zona o área completamente despejada, preferiblemente plana, libre de obstáculos tales como edificaciones o viviendas, árboles de tamaño medio o alto, taludes de alta pendiente, estructuras civiles como puentes, torres de transmisión u otros (conocido como Plano de Emplazamiento). Se utiliza el criterio de elegir un punto de medición con una distancia de retiro de entre 2 y 4 veces la altura del obstáculo más cercano.

Debido a las condiciones geográficas de las cuencas en las que opera EPM, algunas veces se encuentran fuertes limitaciones en disponer de un sitio que garantice alta representatividad.

Después de instalado un pluviómetro, se verifica su adecuada operación realizando una prueba de campo con el instrumento verificador, equipo provisto por el fabricante del pluviómetro.

Cuadro 2: Frecuencia de mantenimientos en estaciones de precipitación. (Adaptada de documento EPM [65]).

Tipo de Estación	Frecuencia Anual
Pluviómetro	1 visita

El laboratorio de la empresa cumple con el estándar de la norma ISO 17025 para los procesos de calibración y ensayos.

4.1.8. Proceso de verificación y calidad

La empresa cuenta con un plan de mantenimiento que incluye mantenimientos preventivos y correctivos.

Cada medición cuenta con un proceso de verificación con el fin de comprobar su correcto funcionamiento. El **Cuadro 2** presenta los métodos para la verificación de los parámetros hidrológicos medidos.

Cuadro 3: Técnicas de verificación de una instalación de monitoreo de variables operativas (Adaptada de documento EPM [65]).

Instrumento	Verificación
Nivel	Comparación medición - mira topográfica
Caudal (curva de calibración nivel - caudal)	Comparación medición - aforo
Caudal (tiempo de tránsito)	Comparación medición - aforo Comparación medición - potencia eléctrica
Precipitación	Comparación medición - verificador de campo

También se cuenta con un plan de Gestión de los Sistemas de Información. Éste incluye un plan de gestión de la calidad de datos. Dicho plan incluye verificación en diferentes niveles de los datos recibidos en varios períodos de tiempo para garantizar su consistencia.

4.2. Lareif

Esta sección está basada en el documento *PRácticas Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, Lareif, 2020 [66].

La empresa Lareif cuenta con una central hidroléctrica de filo de agua. La estrategia de diseño, instalación y puesta en servicio de los equipos de medición y sistemas de comunicación se basa en la tercerización a empresas expertas. De igual manera se acude a empresas expertas para la consolidación de la información hidrometeorológica y el seguimiento y revisión de esta información con el fin de identificar datos anómalos y dar aviso al equipo de operaciones de la empresa.

4.2.1. Nivel

La empresa utiliza sensores de nivel para la estimación del caudal aportante así como para la medición de la lámina de agua sobre el azud para la determinación de vertimiento.

Con el objetivo de definir la ubicación óptima y que cumpla con los estándares establecidos por el IDEAM y la WMO, la definición del punto donde se instalan los equipos y se construye la estación limnimétrica, se busca contratar empresas consultoras expertas, con el conocimiento y experiencia necesarios para identificar el sitio que cumpla con las condiciones hidráulicas y que garantice la calidad de la información a utilizar durante la operación de la central.

4.2.2. Aportes

Para los aportes medidos mediante la estación limnimétrica, se realizan aforos, registrando la hora y fecha y se comparan con los registros del sensor para ese tiempo. El valor debe encontrarse dentro de un rango más o menos la incertidumbre asociada a los equipos y la metodología de medición.

Con el fin de garantizar que la curva de gasto de la estación se encuentre siempre actualizada y definir si es necesaria la recalibración de la estación, se realizan aforos periódicos. Las mediciones de caudal se realizan con ADCP o correntómetros, dependiendo de las condiciones del sitio y del flujo.

Para la calibración de la estación limnimétrica, se realizan aforos durante varias épocas del año, con el fin de contar con mediciones en niveles bajos y altos del río. Este proceso se puede realizar en el transcurso de 12 meses, o durante un periodo de transición hidrológica, donde en un periodo de una o dos semanas se puedan realizar aforos en diferentes niveles del río. Adicionalmente, se realizan levantamientos topobatimétricos de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del sitio de medición, con los cuales se calibra un modelo hidráulico, el cual es utilizado para la extrapolación de la curva para niveles mínimos y máximos del río, en los cuales no haya sido posible realizar mediciones directas.

Una vez se cuenta con una curva de gasto, se realizan aforos cada 3 meses en el sitio de la estación, con el fin de actualizar la curva e identificar cambios en la sección, que muestren la necesidad de realizar aforos adicionales para la calibración de una nueva curva de gasto.

4.2.3. Caudal turbinado

Para verificar que el sensor de presión para la medición del caudal turbinado se encuentre registrando valores correctos, se realizan pruebas en sitio de mediciones de caudal, con equipos especializados para este fin, como ADCP o correntómetros, dependiendo de las condiciones, aguas abajo de la descarga. Se comparan las mediciones en sitio con los caudales turbinados registrados por los sensores y se verifica que se encuentren dentro del rango esperado.

4.2.4. Vertimientos

Los vertimientos de la central, corresponden al caudal que pasa por encima del azud y no es aprovechado para la generación. Estos caudales son estimados a partir de la medición del nivel de la lámina de agua sobre el azud, y mediante la ecuación hidráulica del vertedero, se estima el caudal vertido.

Con el fin de verificar que el sensor de nivel ubicado en el azud, esté registrando de manera adecuada, se realizan pruebas en sitio de mediciones de caudal aguas abajo del azud, con equipos especializados para este fin, como ADCP o correntómetros, dependiendo de las condiciones. Se verifica que el caudal vertido calculado a partir del nivel de la lámina de agua sobre el azud, medido por el sensor, sea igual al medido aguas abajo del azud, considerando un rango de incertidumbre asociada a los equipos y la metodología de medición.

4.2.5. Precipitación

Aún cuando la cuenca tributaria es de un área pequeña, se busca tener al menos información de precipitación de un punto en la cuenca, con el fin de realizar el seguimiento al recurso hídrico y poder comparar con información histórica de estaciones del IDEAM de cuencas adyacentes. Para facilidad en la operación y mantenimiento y reducción en los costos, el pluviómetro se ubica en el mismo punto que la estación limnimétrica.

Los registros de precipitación son comparados con registros de precipitación de estaciones en cuencas adyacentes, operadas por el IDEAM, y con registros de precipitación satelital del IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals) de la NASA, con el fin de determinar que los valores registrados por el pluviómetro se encuentren dentro de los rangos registrados por estas fuentes.

4.2.6. Proceso de verificación y calidad

Actualmente no se cuenta con un sistema de información que reúna toda la información hidrometeorológica. La información de las estaciones de caudal y precipitación es registrada en el portal Aquatick, en donde se puede hacer la consulta en tiempo real de las variables.

La información hidrometeorológica es consolidada en una base datos en Excel, la cual es administrada por la empresa consultora.

Partiendo de la información con resolución diaria, se realiza un análisis exploratorio de los datos que corresponde a un procedimiento de familiarización con la información, se desarrolla mediante el cálculo de estadísticos descriptivos y la caracterización de la estructura de distribución de los datos que componen la serie de tiempo. Durante el análisis exploratorio se construyen una variedad de gráficos (distribución temporal de datos faltantes, serie de tiempo, curva de masa, ciclos anuales) que permiten, mediante inspección visual, detectar comportamientos importantes y/o anómalos en la información.

Cuando se lleva la información a resolución mensual se realiza un análisis similar al anterior, partiendo de la serie de tiempo que es construida usando criterios diferentes según la disponibilidad de datos y según la variable hidrológica. Para la información de precipitación, *se maneja un criterio del 50 % de porcentaje máximo de datos faltantes para descartar un mes de registro, en el caso de la información de caudal es del 70 %*. Con este filtro inicial se calculan ciclos anuales y se incluye la información para posteriores análisis.

Para el análisis de series de tiempo anuales, para múltiples estudios hidrológicos se realiza la suposición de que las series cumplen con el criterio de estacionalidad, por esta razón, se realizan pruebas para detectar los cambios y las tendencias en las series, y se remueven de ser necesario.

Para la construcción de series naturales de caudal se ha dado mayor importancia a la información con mediciones sobre el mismo afluente, sin embargo, cuando se tienen periodos faltantes estos son completados con la información disponible que en algunos casos es información traspuesta de una cuenca aledaña o información operativa de la central.

La mayoría de los reportes son generados por la empresa consultora, de acuerdo con lo solicitado en el alcance del contrato. Actualmente Lareif solicita reportes semanales y mensuales con la descripción de las condiciones hidroclimáticas actuales y esperadas, el comportamiento de los caudales afluentes a la central y los pronósticos esperados.

Diariamente se genera el reporte para la carga de la información al portal Neptuno. Semanalmente se genera el reporte de pronósticos de los caudales medios semanales para las siguientes dos semanas, para los periodos en los cuales el sistema se encuentre en estado de vigilancia. Mensualmente se genera el reporte con los pronósticos de los caudales medios mensuales para los siguientes 24 meses, los cuales son enviados a XM antes de la reunión ordinaria del SURER.

4.3. ISAGEN

Esta sección está basada en el documento *Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, ISAGEN, 2020 [67].

Para el diseño de las redes se trata de buscar una referencia inicial existente (estaciones ya instaladas con historia de información) de una entidad o agente del sector. Dicha red se complementa con estaciones enfocadas a cumplir con los requerimientos específicos de ISAGEN tanto para la información de reporte diario operativo como para las necesidades de actualización de series de caudales de largo plazo y de cumplimiento de variables requeridas desde los planes de manejo ambiental de la empresa.

- Se toma como referencia o guía los estándares que ofrece el IDEAM y a partir de las necesidades internas de medición se seleccionan los sitios de monitoreo y los instrumentos de medición.
- Se cuenta con un documento interno donde se tienen estandarizados los instrumentos que se deben utilizar para cada variable a medir, con el objeto de uniformizar el uso del fabricante (de las cuales se tiene buena experiencia de su utilización), unidad de medida, resolución, entre otras. De igual forma existe un documento referencia de las estructuras civiles que se deben usar para cada caso: malla de cerramiento, tipo y longitud de mástil, elementos de protección de los instrumentos y equipos, etc.

Las mediciones de comprobación, pruebas operativas, pruebas de laboratorio, garantías, certificados de conformidad, de calibración y/o de buena instalación se realizan a través de empresas especializadas. El contratista realiza comprobaciones de campo, verificando que los equipos electrónicos reflejen los valores correctos de las variables, así como el adecuado funcionamiento de las fuentes de la alimentación, para esto se apoya en las aplicaciones que vienen integradas al software de medición. Todos los equipos electrónicos son entregados calibrados por parte de los proveedores.

4.3.1. Nivel

Los instrumentos de medición de nivel de embalse se adhieren a estructuras metálicas, adosadas a estructuras civiles como puentes, torres de captación, etc. Los sensores definidos son de tipo radar o ultrasónicos. Estos sensores son calibrados con respecto a una mira física que tiene el mismo sistema de referencia geodésico de las estructuras civiles (presa, vertedero, captación, etc.). La lectura de nivel (en unidades de m.s.n.m.) se realiza en un solo punto tanto para la medición del volumen del embalse (depende de la curva cota-capacidad obtenida de la batimetría) como para la medición del caudal vertido.

La medición de los caudales se realiza mediante la medición del nivel del agua en el río y se calcula mediante la curva de gasto que se desarrolla con información de aforos.

4.3.2. Aportes

Para estimar la curva de calibración (o curva de gasto) se realizan campañas de aforo con una empresa especializada en dicha actividad. Los aforos se realizan principalmente con equipos ADCP. Sin embargo, dentro del alcance al contrato, se indica que se deben utilizar las recomendaciones dadas por el IDEAM y el fabricante para el uso de equipos ADCP. En algunos cauces de magnitudes de caudal menor aún se usan correntómetros previamente calibrados. En todos los casos a la hora de realizar un aforo se verifica la calibración de los sensores de medición del nivel del río mediante la comparación con la mira física instalada en diferentes tramos a la orilla de la estación.

Se cuenta con un contrato para la realización de aforos de caudal en las estaciones de monitoreo con el fin de mantener las curvas de calibración actualizadas. Para la realización de aforos el contratista encargado tiene un plan de trabajo que se actualiza mensualmente. En dicho plan de trabajo se establece la secuencia de estaciones a visitar de acuerdo a la actividad y las distancias. En caso de presentarse eventos súbitos de caudales que afecten las secciones y sea necesario adelantar una campaña de aforos y batimetría de sección de urgencia el plan se puede ajustar.

En general la periodicidad de los aforos depende de la sección hidráulica de la estación asociada y varía entre un mes para secciones menos estables, hasta 3 meses para secciones estables (de márgenes tipo roca y lechos estables).

Dada la periodicidad que existe para la realización de aforos, anualmente se compara el estado de la curva actual con la información recolectada en las diferentes campañas. Cuando se evidencian cambios significativos en la batimetría de la sección se realiza un levantamiento de secciones hidráulicas adicionales aguas arriba y aguas abajo de la sección de la estación y mediante modelos hidráulicos se verifica el comportamiento de la curva. Todos estos análisis se hacen de la mano de un contratista especializado y las decisiones finales de actualización de la curva de calibración quedan referenciadas en el software AQUARIUS.

En el caso que se evidencie que la estación ha venido presentando problemas de inestabilidad de lecho y márgenes se evalúa la posibilidad de cambio de lugar de la estación.

Con la información de caudales de cada río se crea la serie de afluencias de la central, ya sea la serie natural o serie total. Para esto, se utilizan las series derivadas a la menor resolución y se agregan utilizando la metodología de factores de área. Dicha metodología sigue lo descrito en el Acuerdo CNO 917 y específicamente se tiene un acuerdo que aplica a cada central de ISAGEN tanto para la metodología del cálculo de la serie natural en resolución mensual como la estimación de caudales operativos que reportan al CND diariamente.

4.3.3. Caudal turbinado

La lectura del caudal turbinado se realiza a través de sensores de ultrasonido ubicados en las tuberías de carga de las unidades de generación. Los sensores se ubican considerando el espacio disponible dentro de Casa de Máquinas, dado a que normalmente en las áreas de trabajo disponible existen otros accesorios electromecánicos, sensores, etc. En la mayoría de las centrales se han seleccionado equipos de tipo clamp-on (o externos), solo para el caso de centrales nuevas se tienen sensores intrusivos (contacto directo con el flujo). Los sensores miden la velocidad del flujo y en el equipo se parametrizan las demás variables: geometría de la tubería, temperatura del agua, presencia de burbujas, etc.; para así estimar el caudal.

En algunas centrales, donde se tienen condiciones hidráulicas adecuadas, se tienen estaciones hidrométricas complementarias para medir el caudal turbinado que sirven de validación de consistencia de los datos y su implementación obedece al mismo procedimiento descrito para la medición de caudal.

4.3.4. Vertimientos

Para el caso de los vertimientos, se utiliza la medición de los sensores de nivel ubicados en los vertederos.

Para el caso de vertedero con compuertas, la información de apertura (número de compuertas y porcentaje de apertura) proviene de los sistemas SCADA de la central.

Posteriormente se estiman los caudales vertidos con las ecuaciones dadas por el diseñador de los vertederos. Para los vertederos de flujo libre, la función relaciona el nivel de agua por encima del nivel máximo físico del embalse (cresta del vertedero) con el caudal descargado. Para el vertedero con compuertas, se utilizan las expresiones matemáticas desarrolladas por el diseñador, las cuales relacionan el nivel del embalse, el número de compuertas abiertas y el porcentaje de apertura con el caudal.

4.3.5. Descargas no turbinadas

Cuando la descarga no turbinada obedece a caudal que no se capta para generación, se tienen estaciones hidrométricas que siguen el mismo procedimiento descrito anteriormente.

En los casos que se cuenta con válvulas o compuertas, se tienen ecuaciones de descarga definidas a partir del nivel del embalse y del porcentaje de apertura.

4.3.6. Volumen del Embalse

Los levantamientos topobatimétricos se realizan con el apoyo de un contratista. El contrato incluye el levantamiento con ecosonda multihaz para la parte húmeda del embalse y con tecnología Lidar para el levantamiento de la parte seca.

La planificación de las batimetrías se hace desde el año previo al que se requieren hacer los trabajos de campo y se tiene en cuenta el comportamiento histórico de los niveles del embalse para definir cuándo es el momento más conveniente para ejecutar el levantamiento con ecosonda multihaz y levantamiento con sistema Lidar, buscando que la información de estos dos tipos de levantamiento tenga una banda adecuada de traslape.

Durante el año en que se requieren hacer los trabajos de campo se hace un seguimiento permanente de los niveles de embalse y se realizan proyecciones del comportamiento esperado del embalse según las condiciones reales hidrológicas y de generación, para entregar la información de manera oportuna al contratista para que realice su planificación interna.

Dependiendo de la época del año y el comportamiento esperado del embalse se toma la decisión sobre cuál tipo de levantamiento ejecutar primero, buscando siempre que el levantamiento con ecosonda se haga con el nivel de embalse más alto posible y la captura de información con tecnología Lidar se realice en el nivel más bajo.

Para el caso de la estimación del volumen almacenado en los embalses el procedimiento inicia con la carga de la curva nivel (cota) – volumen útil o cota – volumen total en el sistema AQUARIUS. Dicha curva consta de una tabla a resolución de 1 cm que relaciona cada nivel del embalse con un valor de volumen en millones de metros cúbicos. Dado que la batimetría tiene una vigencia, se utiliza el mismo gestor de curvas de calibración creando una curva cota-volumen cada vez que se actualiza la batimetría.

A partir de la curva y la serie de nivel con resolución 10 minutal se genera una serie derivada de volúmenes en resolución horaria que permite reportar ya sea el volumen promedio durante una hora, 1 día, o un valor específico como el de la hora 24 del día anterior, el cual corresponde al valor que se reporta diariamente al CND.

4.3.7. Precipitación

Se tienen instalados pluviómetros automáticos de tipo balanza. Están instalados en estructuras metálicas, de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial.

Verificación de conteos en campo de cada uno de los pluviómetros según el manual del fabricante. La información de la visita se incluye en el software AQUARIUS.

4.3.8. Proceso de verificación y calidad

- Caudal (Aportes, descargas no turbinadas y turbinadas)

La verificación de niveles con los cuales se estiman los caudales, se realiza mediante la verificación en campo a través de las visitas de mantenimiento en la cual se confirma que las lecturas de los sensores corresponden a las indicadas en la mira física instalada en la estación y a través del software AQUARIUS, el cual utiliza la empresa para gestionar toda la información hidrológica. A este software llegan los datos en resolución 10 minutos tanto del sensor principal como del sensor de respaldo (aplica para las estaciones de ríos principales que reportan información operativa diariamente). Posteriormente se confirma la información con el dato de la visita de campo antes y luego de la recalibración realizada durante el mantenimiento.

Para la revisión de datos al interior de la empresa y con la ayuda de AQUARIUS, se cuenta con personal designado a la tarea de revisión de datos inicial. Posteriormente dichas revisiones pasan por un proceso de validación y aprobación por personal diferente. Nuevamente todo este proceso queda registrado en la herramienta.

Para las descargas no turbinadas que se leen en estación hidrométrica, se sigue el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Para el caudal turbinado, personal técnico de cada central, periódicamente realiza una verificación de la ubicación de los sensores de ultrasonido, cambio de gel de contacto del sensor, revisión de configuración del equipo de transformación de la señal. Cada central tiene guías de mantenimiento de los sensores de medición por ultrasonido.

Para la mayoría de las centrales a las que se le instalaron equipos externos se están revisando los datos históricos comparándolos con la generación. Para las centrales nuevas (con equipos de ultrasonido internos de contacto directo con el flujo) se realiza un proceso de verificación de los datos comparando la información de caudal de cada unidad con la generación.

La empresa cuenta con sistemas de medición tipo Perfiladores Acústicos con Tecnología Doppler (ADCP) y mantiene operativo un contrato con una empresa especializada para la ejecución de aforos de caudal líquido y sólido quien a su vez tiene un equipo de similares características.

Se cuenta con una ecosonda monohaz y equipos para medición de sedimento en suspensión. Adicionalmente se cuenta con un caudalímetro portátil para verificación de lecturas de los sensores clamp on instalados para medición del caudal turbinado.

- Nivel (Aportes, volúmenes, vertimientos)

Se ejecuta el mismo procedimiento de revisión de las estaciones hidrométricas de río a los sistemas de medición de nivel del embalse. En los casos que se cuenta con información de estaciones aguas abajo, se realizan verificaciones de consistencia (órdenes de magnitud) entre la información

de caudal entregado por el vertedero versus la medición en la estación (aplica igual para caudal turbinado).

4.4. Celsia

Esta sección está basada en el documento *Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, Celsia S.A., 2020 [68].

Desde el 2017, Celsia viene ejecutando un plan de estandarización de variables meteorológicas en 2 componentes: equipos y datos. La información que es usada para el reporte de variables operativas tiene un tratamiento diferenciado. La empresa busca que la disponibilidad de información sea del 100 % y que las incertidumbres sean las menores posibles.

Se toman como referencia los documentos de la Organización Mundial de Meteorología, IDEAM y Normas técnicas de otros países. A partir de estas referencias se elabora un documento interno con las especificaciones técnicas mínimas de los diferentes sensores. Dicho documento recibe actualizaciones periódicas acorde con las mejoras tecnológicas y la experiencia en el uso de equipos.

La frecuencia de recolección de información es minutal, mientras que la de transmisión depende de las características de la estación (ubicación) y van desde cada 5 minutos hasta cada 3 horas.

4.4.1. Nivel

Los instrumentos de medición de nivel de embalse normalmente están ubicados en alguna estructura de la captación, presa o similares. Los sensores definidos para la medición son de tipo radar, ultrasónicos, presión o burbujeo.

Estos sensores son referenciados a una mira física que tiene el mismo sistema de referencia geodésico de las estructuras civiles (presa, vertedero, captación, etc.)

La lectura de nivel (en unidades de m.s.n.m.) se realiza en un solo punto tanto para la medición del volumen del embalse (depende de la curva cota-capacidad obtenida de la batimetría) como para la medición del caudal vertido.

4.4.2. Aportes

Para los caudales, Celsia dispone de pocas estaciones propias para la medición directa, en los casos donde se tiene, la variable que se mide es el nivel del agua en el río a monitorear. Los caudales se calculan a partir de la curva de gasto desarrollada a partir de la información de aforos.

Para la construcción de la curva de calibración en cauces naturales se realizan los aforos necesarios siguiendo recomendaciones tanto del IDEAM, OMM y USGS. El equipo normalmente usado es ADCP y se trata de realizar **al menos un aforo mensual**.

La aplicación de la vigencia de la curva es decidida por los profesionales de Celsia y normalmente se selecciona para ecuaciones por tramos de niveles.

En el caso que se evidencie, a partir de los datos o aforos, que la estación presenta problemas de inestabilidad de lecho y/o márgenes se evalúa la posibilidad de cambio de lugar de la estación.

En caso de requerir comprobaciones adicionales se usan modelos hidráulicos usando información topográfica y batimétrica de un tramo representativo de la estación que representan la variación de los niveles en la corriente.

En la mayoría de las centrales Celsia usa el **balance hídrico** para determinar los aportes. Este método consiste en un balance de masa de agua, donde el aporte es el resultado del agua almacenada (volumen) menos la cantidad de agua que sale del mismo como agua turbinada, vertimientos o descargas no turbinada.

4.4.3. Caudal turbinado

Para la mayoría de sus centrales Celsia usa el método de transformación del factor de conversión (FC) en agua. Para definir el factor de conversión siguen los protocolos establecidos por el CNO.

4.4.4. Vertimientos

Para el caso de los vertimientos a flujo libre, se utiliza la medición de los sensores de nivel. La metodología que transforma nivel en caudal o volumen vertido está asociada a la curva de descarga asociada al vertedero.

Para el caso de los vertederos con compuertas la información se gestiona similar a las descargas no turbinadas.

Para determinar los caudales vertidos, en las estructuras de los vertederos se cuenta con medidores que establecen la geometría de apertura de las compuertas y el nivel de embalse y se utilizan métodos en los cuales se establecen curvas teóricas a partir de las características hidráulicas de las estructuras.

En algunos casos para la verificación de dichas curvas se ajustan con modelos físicos a escala construidos durante la etapa de diseño o durante la operación con modelos computacionales (tipo CFD).

4.4.5. Descargas no turbinadas

Para las descargas no turbinadas, correspondiente a caudales que no se captan para generación, se cuenta con válvulas o compuertas, que tienen ecuaciones de descarga definidas a partir del nivel del embalse y del porcentaje de apertura. Los valores de porcentaje de apertura provienen de lecturas de sensores de medición ubicadas y mantenidas por los grupos de trabajo de cada una de las centrales.

4.4.6. Volumen de embalse

Con los sensores de nivel en los embalses se realiza la determinación del volumen según las ecuaciones determinadas para cada central. Los niveles y volúmenes son registrados a resolución horaria. El valor de la hora 24 del día anterior es el que se reporta diariamente al CND.

El volumen del embalse se estima a partir de una construcción topo batimétrica de la que se obtiene la información para determinar una tabla que relaciona el volumen con un nivel específico (ecuaciones de ajustes Nivel- Volumen- Área). La batimetría tiene una vigencia establecida según los protocolos del CNO.

Celsia no utiliza equipos propios para la realización de batimetrías, por lo que las verificaciones realizadas al respecto se centran en comprobar el cumplimiento de los procesos y metodologías acordadas con los contratistas.

4.4.7. Precipitación

Se tienen instalados pluviómetros automáticos cuyo principio de medición es peso; están instalados de acuerdo con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial. Sin embargo, la mayoría de esta información no es usada para el reporte de variables hidráulicas.

4.4.8. Proceso de verificación y calidad

Normalmente el control de calidad inicial se realiza durante el proceso de instalación por medio de verificación de calibraciones y, si es del caso, usando verificación de las mediciones.

La información se valida inicialmente por medio de herramientas estadísticas automáticas y supervisadas mediante las cuales se verifican desviaciones, cambios y tendencias. Este proceso se realiza mediante la aplicación de filtros automáticos auditados, es decir, en caso de que el filtro detecte una anomalía, personal entrenado verifica la misma y emprende acciones en caso de requerirse (modificación, cambio del dato o anulación). La validación se realiza diariamente, sin embargo,

se realizan auditorías mensuales y anuales con el fin de detectar comportamientos atípicos en las series. Adicionalmente se tienen procedimientos estadísticos para el llenado de datos faltantes.

Posteriormente la información es entregada a los diferentes usuarios, los cuales pueden reportar cualquier cambio u observación de los datos (funciona como un auditor adicional), luego se hace un proceso de auditoría en donde se almacena como información histórica después de pasar otra serie de pruebas y de realizar correcciones de ser necesario. En resumen, se manejan 2 bases de datos una con la información más reciente con validaciones simples y automáticas y otra histórica en donde se hace la auditoría y correcciones necesarias.

En algunas estaciones se tiene redundancia de sensores, en caso de que por motivos de registros o desconexión se pierda información, esta es completada por procedimientos estadísticos de llenado de datos faltantes.

4.5. ENEL - Emgesa

Esta sección está basada en el documento *Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, ENEL, Emgesa, 2020 [69].

Los procedimientos de medición se establecen de acuerdo con los estándares establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua del IDEAM, así como de la Guía de prácticas hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial, en sus versiones más recientes para el caso de las estaciones hidrométricas. Las mediciones se realizan dando cumplimiento a la regulación vigente del sector, es decir a los diferentes documentos emitidos por la CREG y el CNO.

En EMGESA, la mayoría de los sistemas de medición son automáticos y se encuentran enlazados con el SCADA de las plantas y la compañía, adicionalmente se cuenta con sistemas manuales de respaldo en caso de falla. En los sistemas manuales de medición se llevan bitácoras en las que se registran las mediciones a diferentes resoluciones temporales. En caso de ser necesario los registros se comunican telefónicamente a las plantas y centro de control para su correspondiente reporte. En uno de los recursos, la medición del nivel del embalse se realiza solo de manera manual debido a que las limitaciones tecnológicas y físicas no permiten obtener mediciones confiables con sistemas automáticos convencionales.

4.5.1. Nivel

En cuanto a la variable nivel de embalse, la cual sirve para la estimación del volumen de embalse y es una entrada para la determinación de caudales vertidos y descargados, se busca un lugar que permita barrer toda la profundidad del embalse, por lo general es en la presa o cerca de ésta. Por

otro lado, también se busca un lugar de propiedad de la Compañía para garantizar la seguridad de los equipos de medición.

Para la estimación del volumen de embalse se utiliza el nivel medido de manera automática, el cual siempre cuenta con sistema de miras para la medición manual en caso de falla del sistema automático o que no pueda instalarse debido a las limitaciones tecnológicas y físicas.

El sistema de miras se ubica en lugar visible, de fácil acceso y cubre todo el rango de la profundidad del embalse, incluso los niveles altos de vertimiento. Las miras son instaladas generalmente en muros verticales y en la cara interna de la presa o sus estribos, garantizando su estabilidad sin asentamientos y resistencia a la intemperie o ambientes corrosivos.

Se cuenta con dos sistemas de medición automáticas del nivel del embalse: sondas de presión y sensores de radar, ambos sistemas son instalados por empresas contratistas, las cuales garantizan la instalación y puesta en marcha de los sistemas de medición y la comunicación con el sistema SCADA de la compañía. Las sondas de presión son instaladas en la cara interna de la presa en tubería con vasos comunicantes. Los sensores de radar son instalados cerca de los vertederos, pozos o torres de captación de tal forma que se garantice la visual directa con el espejo de agua del embalse y las distancias recomendadas por los fabricantes.

Los equipos electrónicos utilizados para la medición de nivel en cauces son sensores de radar, con precisión inferior a un centímetro, y su instalación se realiza con base en los criterios establecidos por el fabricante.

La lectura de nivel en cauces y embalses se verifica con una regla graduada o mira y se valida con un sensor de igual o mayor precisión.

4.5.2. Aportes

Los aforos se realizan por medio del método de Vadeo, con el personal aforador dentro del cauce cuando el nivel y las condiciones de seguridad lo permiten, o utilizando un bote que permita el vadeo. Adicionalmente, se emplea el método por suspensión o poleas, sosteniendo el equipo desde puentes, tarabitas o estructuras fuera del cauce, cuando las condiciones del flujo impiden el ingreso del personal al cauce y no es factible el uso de un bote.

Cuando las condiciones del flujo (profundidad y velocidad) presentan condiciones de riesgo para los operarios y equipos, es necesario realizar las mediciones desde una estructura elevada. Aquí el equipo a utilizar es un sistema catamarán con sensor de flujo doppler y PDA para un control inalámbrico de la medición y para recibir los resultados de la medición.

En algunas estaciones se tiene un convenio con el IDEAM para llevar a cabo los aforos, levantamiento batimétrico, revisión y ajuste de la curva de nivel-caudal, con los equipos del IDEAM

(molinetes y ADCP) de manera más frecuente comparado con las demás estaciones de la red nacional gestionada por ellos.

Los aforos líquidos tienen una periodicidad variable (quincenal, mensual o bimensual) de acuerdo con las necesidades específicas establecidas a partir de un análisis hidráulico; con lo que se busca cubrir el rango total de variación del nivel del agua en cada uno de los cauces. El objetivo es obtener los puntos de la curva nivel-caudal en todo el rango de operación y en consecuencia obtener un buen ajuste de dicha curva.

La curva nivel-caudal está vigente mientras las condiciones geométricas de la sección se mantengan uniformes según las revisiones y análisis realizados cada vez que se realiza un aforo o un levantamiento topobatómico. Se realiza una topobatimetría semestralmente para validar las condiciones de estabilidad del cauce.

Cuando se observa que los caudales aforados se apartan de la curva definida, se realizará un análisis con el objeto de verificar si la sección fue modificada por una creciente; en este caso se inicia la construcción de una curva nueva con los aforos que se obtengan después de ocurrida la creciente.

La actualización de la curva con la inclusión de los aforos durante el año, permite mostrar consistencia y continuidad. Los valores aforados no deben superar el 10 % de la dispersión.

Otra metodología usada en algunos de los sistemas de generación para el cálculo del afluente es el Balance Hidráulico, cuyo principio es la conservación de la masa.

4.5.3. Caudal turbinado

Los caudales turbinados pueden ser medidos con caudalímetros o estimados a partir de las curvas colinas de las unidades de generación o estimados a partir de la energía generada (medida en contador) y el Factor de Conversión.

Para el caso de los caudales turbinados se examinan las condiciones de los túneles de carga para determinar si éstos son aptos para la instalación de caudalímetros y así realizar la medición de manera más directa; en algunos casos se realiza modelado mediante el método de los elementos finitos para simular las condiciones de flujo y estimar la precisión de la medición antes de instalar caudalímetros. Este sistema de medición aplica tanto para centrales de despacho central como para centrales no despachadas centralmente. Actualmente EMGESA se encuentra en la transición de estimaciones de caudal turbinado a partir de Factor de Conversión (FC) o curvas colina a este tipo de medición, el cual supone menor incertidumbre de la variable siempre y cuando las condiciones físicas lo permitan.

Los caudalímetros son instalados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, lo que garantiza la correcta medición de la velocidad y caudal dentro la tubería. Sin embargo, se comparan estas

mediciones con otras variables como energía generada y factor de conversión con el fin de verificar el funcionamiento consistente del instrumento.

4.5.4. Vertimientos y descargas

El cálculo de los vertimientos por borde libre tiene como insumo el nivel medido del embalse y las curvas de descarga establecidas en el diseño. Para los vertimientos y descargas por compuertas, se tienen establecidas curvas o tablas de caudal en función del nivel del embalse y la apertura de las compuertas, determinadas mediante estudios hidráulicos.

4.5.5. Volumen de embalse

El volumen de un embalse se obtiene a partir del nivel medido automáticamente o manualmente, éste se pasa por la curva batimétrica construida cada 5 años o menos tiempo con equipos de última tecnología que permiten obtener modelos espaciales del fondo del embalse de alta resolución.

Los trabajos batimétricos se llevan a cabo mediante compañías especialistas que cumple con estándares internacionales en cuanto a sistemas de monitoreo y operación. En los levantamientos batimétricos se emplean instrumentos topográficos, ecosondas multihaz para la zona húmeda y LiDAR para la zona seca, cuantificando también la incertidumbre de la medición de acuerdo con la norma de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI).

La calidad de la batimetría se garantiza con la calibración periódica de los instrumentos y con la verificación de los mismos al inicio y durante la actividad de los levantamientos.

Para el caso de las batimetrías se planifican las actividades topográficas, batimétricas y de LiDAR, teniendo en cuenta la seguridad laboral, traslado de equipos, permisos de trabajo y programa de generación de la planta con el fin de realizar los trabajos bajo condiciones atmosféricas y de operación seguras y que garanticen la calidad de los resultados, por ejemplo, cielo despejado para el levantamiento LiDAR y suficiente traslape entre actividades batimétricas y LiDAR.

El volumen de un embalse se obtiene a partir del nivel medido automáticamente o manualmente, éste se pasa por la curva batimétrica construida cada 5 años o menos tiempo con equipos de última tecnología que permiten obtener modelos espaciales del fondo del embalse de alta resolución.

4.5.6. Precipitación

La empresa cuenta con dos tipos de pluviómetros: de peso y de cazoleta. Los de peso son calibrados con un juego de pesas calibradas y certificadas a través de un programa software suministrado por el fabricante. Los de cazoletas se calibran a través de una botella aforada.

4.5.7. Proceso de verificación y calidad

Para las variables de caudal turbinado, caudal vertido, caudal descargado y nivel, los operadores de las plantas realizan validaciones cruzadas con información operativa como energía generada, factor de conversión, variación del nivel, etc. y validaciones con los sistemas manuales de medición, verificando permanentemente la consistencia de los sistemas de monitoreo.

Se realizan visitas semestrales por parte del personal de EMGESA y del contratista a la red de estaciones hidrometeorológicas con el fin de verificar el estado de los equipos y la infraestructura asociada, la transmisión de los datos, el cumplimiento de la normatividad SSL y el estado del equipo utilizado por el contratista en sus labores de mantenimiento de las estaciones.

Enel cuenta con dos sistemas de información operativa donde almacena la información operativa de las centrales de generación, incluyendo los datos hidrológicos como caudal afluente, caudal turbinado, caudal vertido, niveles de embalse.

Se dispone de un sistema de monitoreo en tiempo real para las centrales de generación y sus embalses, basado en la herramienta Plant Information (PI) que recopila datos de los sistemas SCADA de planta. Está proyectado que la información de planta pueda llegar al sistema de información automáticamente desde el SCADA en planta.

La información proveniente de las plantas de generación y embalses se recibe con resolución horaria. También se recibe información de terceros (CAR y EAAB) mediante correo electrónico con resolución diaria. La red de estaciones hidrométricas ubicadas en campo, a resolución horaria o menor (15 minutos). Todas las estaciones de la compañía son automáticas.

La información de las centrales de generación y los embalses se valida manualmente por cada central de generación antes del cargue diario a los sistemas de información. Adicionalmente de manera centralizada se realiza revisión periódica de los datos con el fin de evaluar su calidad. La validación de los registros se realiza de forma mensual, bimensual y semestral.

Inicialmente, se revisa la estructura general de los datos con el fin de evitar que se presenten errores de formato en los registros. Los registros quince-minutales son sometidos a controles de rango fijo con el fin de identificar valores erróneos físicamente imposibles o nunca antes observados en los registros históricos.

Mensualmente se realiza un análisis descriptivo de los registros donde se calculan los principales parámetros estadísticos representativos (media, desviación estándar, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría, etc.). Adicionalmente, se realiza un análisis gráfico donde por medio de una inspección visual se busca identificar valores sospechosos o cambios en la tendencia de los registros utilizando tipos de gráficos como de series de tiempo, Box Plot, histogramas, etc.

Con el fin de identificar valores atípicos o sospechosos se establecen controles de calidad a partir de parámetros estadísticos, donde se identifican los valores registrados que superan un umbral

definido. Además, se define la tasa de cambio máxima permisible entre valores consecutivos.

Dependiendo de la variable a analizar, la estimación de datos faltantes se realiza por medio del método de regresión y correlación con otras estaciones, el método de interpolación o por medio de la estimación de datos faltantes a partir de otra variable.

Cada 6 meses las variables meteorológicas son sometidas a pruebas de homogeneidad con el fin de verificar que las variaciones contenidas en los registros corresponden a procesos meteorológicos y no a otros factores.

4.6. AES Colombia

Esta sección está basada en el documento *Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, AES Colombia, 2020 [70].

Las estaciones hidrométricas que se ubican dentro de la cuenca aportante al Embalse La Esmeralda, son estaciones que iniciaron operación a partir de la década de 1950 siendo propiedad del HIMAT, ahora IDEAM, y que se usaron para evaluar la factibilidad del proyecto. Con el propósito de conservar los registros históricos desde entonces, se han utilizado las mismas estaciones para el monitoreo de la cuenca y operación de La Central. La red está compuesta actualmente por 51 estaciones de hidrometría, ubicadas en la parte baja, media y alta de la cuenca. Diez (10) de ellas son operadas por AES y cuentan con telemetría, y los 41 restantes son operadas por IDEAM. Del total de estaciones 16 de ellas son Limnimétricas y 35 Pluviométricas.

En junio de 2020 se inició una consultoría de diagnóstico, optimización y diseño de la red de monitoreo hidrometeorológica de AES Colombia para las cuencas de los embalses La Esmeralda, Tunjita y Rio Negro, la cual tiene por objeto realizar el diagnóstico de la red existente, y establecer la propuesta de optimización que busca maximizar la representatividad de las estaciones, existentes o nuevas, teniendo en cuenta las necesidades de monitoreo y pronóstico definidas por AES.

La operación de los instrumentos de medición hidrométrica de la Central Chivor, inician bajo instructivos realizados por el IDEAM, donde se establecen los lineamientos generales para la realización de aforos líquidos por vadeo o suspensión, lecturas de mira y propuesta de registro. AES Colombia ha tomado como referencia el documento “Mediciones hidrométricas – IDEAM, año 1999” para establecer su operación relacionada con la medición hidrológica.

Las estaciones hidrométricas fueron seleccionadas desde la etapa de prefactibilidad del proyecto bajo criterios ingenieriles de estabilidad y representatividad. Dichas estaciones presentan secciones relativamente estables en el tiempo, donde los procesos de agradación o degradación no han sido significativos y ello permite manejar curvas de cálculo nivel - caudal sin mayores cambios en el tiempo. Trimestralmente se realiza un levantamiento topobatimétrico en las estaciones principales para

corroborar si han presentado cambios significativos en la sección del río que obliguen a la revisión de las ecuaciones de cálculo. De manera preventiva, dentro de las inspecciones las estaciones que se realiza al menos una vez al año, se establece la necesidad de ejecutar obras de estabilización de taludes que puedan afectar el cauce y por consiguiente la medida.

AES Colombia cuenta con información en tiempo real de las estaciones principales que llegan vía radio, GRPS (celular) o GOES (satelital). Otra fuente de información es la que toman los observadores o personas en sitio quienes toman lectura de mira en el río tres veces al día, a las 6:00 horas, 12:00 horas y 18:00 horas, cuyos registros se llevan en planilla física y que es entregada los primeros 5 días del mes siguiente al área de hidrología, lo cual permite hacer chequeo cruzado junto con el caudal calculado de manera operativa.

Los datos de las estaciones de telemetría son transmitidos cada 15 minutos al Centro de Control vía radio, GRPS (celular), o GOES (satelital).

4.6.1. Nivel

Nivel de río: El nivel de río de toma a través de sensores tipo radar en unidades de “metro” con un rango aproximado de 0 a 20 metros y una precisión de $\pm 0,02$ mts. También se cuentan con las lecturas de mira de los observadores mencionadas en anteriormente.

Nivel de Embalse: El nivel de embalse es el resultado de las lecturas de mira con longitud 2,0 metros y precisión de $\pm 0,05$ mts, las cuales son tomadas desde las cámaras de video instaladas en el sector de la Presa o directamente por personal operativo en sitio.

Tanto para niveles de río como nivel de embalse, las miras instaladas se verifican mediante topografía y puntos de control de referencia. Para el caso de las estaciones hidrométricas, se cuentan con estaciones de respaldo aguas arriba que pueden dar cuenta del caudal afluente y permiten estimar el orden de magnitud de los registros tomados en un mismo río.

4.6.2. Aportes

En campo el parámetro a medir es el nivel de río, el cual se obtiene mediante sensores de nivel tipo radar que toman las lecturas en resolución *horaria*. Adicionalmente, se cuenta con registros de lectura de mira instaladas en las márgenes de los ríos tomadas por personal externo conocido como “observadores”, cuyos registros físicos son obtenidos los primeros cinco (5) días del mes siguiente.

Actualmente las estaciones principales con las que se calcula el aporte al Embalse La Esmeralda, cuentan con un sistema telemétrico, el cual registra datos cada hora y es procesado mediante el sistema de transmisión GOES.

La ejecución de los trabajos relacionados con los aforos es tercerizado, pero los equipos de medición son suministrados por AES. El sistema de gestión de calidad de la compañía involucra la comprobación de los molinetes cada 6 meses mediante una canaleta Parshall instalada en infraestructura de AES, y calibración de estos equipos cada tres (3) años o antes si se identifican fallas en las mediciones, el cual se hace a través de instituciones avaladas para este objeto.

Mensualmente se realizan campañas de aforos y al menos dos (2) campañas topográficas al año para levantar la sección transversal del sitio de medición e identificar posibles cambios. Esta actividad comprende el levantamiento de perfiles de velocidad de la corriente siguiendo el mismo protocolo de medición de las estaciones hidrométricas del IDEAM. El alcance y metodología del servicio de aforos se describe a continuación.

La metodología de medición variará de acuerdo a las condiciones del lugar y disponibilidad de estructuras y equipos. Los tipos y sitios de aforos a realizar en el contrato son:

1. Aforo por el método área – velocidad (vadeo o suspensión) con correntómetro, o aforo mediante instrumento ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler): veinticinco (25) estaciones distribuidas sobre los ríos Garagoa, Somondoco, Negro, Lengupá, Tunjita y sobre las quebradas Honda y Pinos.
2. Aforo mediante estructuras hidráulicas (vertederos y canaletas): veintiséis (26) estructuras ubicadas sobre la ruta de las conducciones

Para los caudales mensuales, se contrata con un tercero durante el primer trimestre del año, el análisis de las curvas de calibración vigentes para el año anterior, y se recalculan los aportes en caso de identificar un ajuste en alguna de las curvas. Los valores recalculados son notificados al CND conforme se dispone en el acuerdo CNO 917 de 2016.

Anualmente, el consolidado de los datos hidrológicos registrados en los aforos líquidos tomados en cada uno de los ríos afluentes del Embalse durante los doce meses del año es remitido a un Consultor Especializado, quien efectúa una revisión y análisis de los registros, con el objeto de ajustar las Ecuaciones de Cálculo de Caudales en función del nivel de río, las cuales estarán vigentes para su aplicación en el año en curso.

4.6.3. Caudal turbinado

Los caudales turbinados son estimados de manera indirecta a partir de la generación y el factor de conversión. Adicionalmente cada unidad de generación cuenta con un sensor de ultrasonido ubicado en las tuberías de carga, cuyo registro es enviado al display de los tableros de cada unidad y almacenado en SCADA.

4.6.4. Vertimientos y descargas

Los caudales no aprovechados para generación, en el caso de la Central Hidroeléctrica de Chivor son los correspondientes a los vertimientos realizados en la presa del embalse La Esmeralda. Estos vertimientos son estimados a partir de la curva de descarga de las compuertas. La curva de descarga relaciona el caudal vertido por la estructura (en m^3/s) con el nivel de embalse (en m.s.n.m) y apertura de la compuerta (m). Los de rebose son estimados con las curvas de descarga de las estructuras.

La apertura de compuerta obedece a una consigna operativa que involucra escenarios para toma de decisiones, y la curva de descarga (en m^3/s), que relaciona el nivel de embalse (en m.s.n.m), y apertura de compuerta (m).

4.6.5. Volumen de embalse

Las batimetrías programadas en el embalse están acorde a la frecuencia establecida en el procedimiento descrito en el acuerdo CNO 1287. Al menos un (1) año antes del periodo previsto para los trabajos en campo se realiza el proceso de licitación y contratación de la empresa que posea los equipos con tecnología multihaz, realice el levantamiento, haga el procesamiento de datos y elabore los planos y tablas que muestren la evolución sedimentológica en el embalse y valoren la capacidad de almacenamiento de éste. Conforme al acuerdo en mención se proyecta el uso de embalse para estimar el periodo en el que logre el nivel mínimo recomendado para el levantamiento batimétrico. La operación batimétrica en todas las etapas del levantamiento multihaz están fundamentadas bajo las normas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) publicada en el documento S-44.

4.6.6. Precipitación

La precipitación se estima a partir de los pluviómetros instalados en las estaciones hidrométricas, los cuales pueden ser convencionales cuyas lecturas son tomadas por los observadores, o pluviómetros automáticos tipo balancín o tipo radar ubicados en las estaciones principales y que transmiten en tiempo real.

En estaciones principales se cuenta con registros de sensores automáticos y pluviómetros convencionales. También se cuenta con estaciones suficientes que permitan inferir la precipitación cuando existan faltantes de información.

4.6.7. Proceso de verificación y calidad

Con el fin de verificar y controlar la calidad de los datos, se plantearon indicadores de “desviación de cuantificación de afluencias” cuya finalidad es comparar mensualmente los registros diarios

obtenidos de forma indirecta (caudal operativo) y caudales medidos (de telemetría y/o observadores) cuya diferencia promedio diaria no debe ser superior al 15 % y no debe presentar ninguna tendencia. Otra forma de verificar los datos obtenidos en campo es la comparación de la lectura de mira y la obtenida por el sensor de nivel, la cual hace parte de las actividades durante la ejecución de cada campaña de aforos.

AES realiza por medio de limnímetros o de lectura de mira, tres lecturas diarias de niveles en estas estaciones, y realiza aforos para actualizar anualmente la curva de calibración nivel – caudal, que permite convertir los niveles, en caudales medios diarios.

Las lecturas manuales que se realizan son aquellas relacionadas con las de nivel del río y precipitación a través de miras y pluviómetros convencionales respectivamente. Dichas lecturas las toman personas de la región conocidas como “observadores” los cuales diligencian las planillas con la información de estos parámetros de acuerdo de procedimientos establecidos por el IDEAM (tres veces al día lectura de nivel de río a las 6hrs, 12 hrs, y 18hrs, y lectura del pluviómetro diariamente a las 7hrs).

De manera preventiva se realiza inspección a las estaciones al menos una vez al año para revisar de manera integral infraestructura, equipos de medición y transmisión.

Los procedimientos para el análisis de información a escala diaria se basan en la comparación de la información obtenida de manera operativa (balance hídrico) y la calculada a partir de las curvas en función del nivel del río. Por sistema de gestión de calidad la diferencia entre éstas no deben ser superior al 15 % promedio diario. Para el caso de la información reportada en NEPTUNO, luego del análisis y la comparación con la información observada, se procede a cargar los primeros cinco (5) días del mes siguiente en dicho sistema la información ajustada.

4.7. Central Hidroeléctrica Urrá

Esta sección está basada en el documento *Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas*, Central Hidroeléctrica Urrá, 2020 [71]

4.7.1. Nivel

El nivel del embalse se mide a través de sensores de presión de un proveedor reconocido a nivel mundial, ubicado en un sitio que no se ve influenciado por oleaje u otras perturbaciones. Se cuenta con dos sensores de nivel del embalse, uno de los cuales es redundante y se utiliza como verificación de las mediciones del primero. Dichos sensores están ubicados en el embalse cerca de la estructura de toma, aunque suficientemente alejados para evitar perturbaciones. Los datos de los sensores

son transmitidos al sistema SCADA en el edificio de control. Los sensores son utilizados para estimar los volúmenes del embalse, los aportes (balance operativo) y los vertimientos a través de la curva de calibración del mismo. Estos sensores fueron instalados mediante un contrato con el proveedor y la interventoría la realizó Urrá.

Además de lo anterior se cuenta con una medición visual a través de una regla ubicada cerca a la estructura de toma, que permite tener una buena aproximación del nivel con propósitos de verificación y respaldo.

4.7.2. Aportes

Debido a las condiciones de orden público no ha sido posible instrumentar la cuenca aportante al embalse, así que los aportes se estiman a partir de balance hídrico, también llamado balance operativo en el sector.

Si bien en estos momentos no se cuenta con estaciones hidrométricas para medición de caudales en los afluentes al embalse, en el pasado se instalaron algunas estaciones que luego fueron vandalizadas, pero en su momento para construir la curva de gastos de las estaciones los aforos se hicieron siguiendo las recomendaciones del IDEAM en su guía de prácticas hidrológicas.

4.7.3. Descargas turbinadas

Las descargas turbinadas se miden con sensores de ultrasonido de un proveedor reconocido a nivel mundial, y se instalaron de 8 vías o caminos 8 (8 pares de sensores para cada una de las conducciones de carga) con el objeto de garantizar la calidad de las mediciones. Sin embargo, no se realiza ninguna verificación de estas medidas con un sistema que tenga igual o mejor precisión que el instalado.

Mediante contrato con el proveedor se instalaron sensores de ultrasonido en los túneles de carga de las unidades de generación. La interventoría al suministro y la instalación la realizó Urrá.

El mantenimiento preventivo de las descargas turbinadas se realiza siguiendo las recomendaciones del fabricante. Consiste básicamente en limpieza de los sensores y en la corrida de un software que muestra la integridad de los equipos a partir de los valores reportados. El mantenimiento correctivo de este sistema consiste en el reemplazo de los sensores de ultrasonidos que se dañen.

4.7.4. Vertimientos y descargas

Las descargas no turbinadas son estimadas utilizando las curvas de calibración suministradas por los fabricantes. Las descargas por rebosadero y descarga de fondo en las pocas ocasiones en que han

sido utilizadas estas estructuras, se estiman a partir de las ecuaciones de calibración suministradas por los fabricantes.

El rebosadero de Urrá cuenta con dos compuertas verticales combinadas con diques fusibles. Las descargas a través de los diques se estiman utilizando la curva de calibración de estos y el nivel del embalse medido con los sensores que transmiten al sistema SCADA. El caudal evacuado por las dos compuertas se estima a partir del nivel del embalse y el porcentaje de apertura de las compuertas, que puede ser leído en el sistema SCADA, pero la operación no puede hacerse desde la sala de control sino directamente en una caseta situada en un costado del rebosadero. Las descargas no turbinadas, en el caso de Urrá a través de la descarga de fondo, no cuentan con un sistema de medida diferente a la curva de calibración de las compuertas verticales, que relacionan el porcentaje de apertura de estas y el nivel del embalse con el caudal descargado.

Los vertimientos se calculan a partir del nivel del embalse y las curvas de calibración de compuertas verticales tipo clapeta y diques fusibles. Con el nivel del embalse reportado en el sistema SCADA, al igual que con el porcentaje de apertura de compuertas también reportado en SCADA, hora a hora se calcula el caudal vertido utilizando un aplicativo que se construyó a partir de una plantilla en Excel.

Las descargas no turbinadas, que corresponden a la descarga de fondo, se calculan a partir de la curva de calibración de las compuertas verticales con base en e porcentaje de apertura de las mismas.

Para las descargas no turbinadas no se realiza ninguna verificación, salvo algunos aforos en el pasado, ya que estas estructuras de descarga se utilizan muy poco. A manera de ejemplo, el último vertimiento en Urrá se realizó en diciembre de 2010 y la descarga de fondo tiene aún un número mayor de años sin utilizarse.

4.7.5. Volumen del embalse

Los volúmenes del embalse se calculan a partir de batimetrías periódicas, siendo esta periodicidad determinada por Acuerdos del CNO, al igual que las bases metodológicas generales establecidas esos Acuerdos. La metodología de las batimetrías ha ido cambiando con el tiempo con miras a tener información cada vez más confiable, es así como anteriormente se utilizaban sondas mono haz y restitución Aero fotogramétrica para el perímetro seco del embalse. La última batimetría se realizó con sonda multihaz y levantamiento LIDAR para el perímetro seco, usando adicionalmente los lineamientos de las normas de la Organización Hidrográfica Internacional para Levantamientos Hidrográficos en su documento S-44.

4.7.6. Precipitación

Se cuenta con dos estaciones meteorológicas cerca al edificio de control de la hidroeléctrica, una de ellas propiedad del IDEAM pero operada por Urrá. Se mantiene el entorno de ambas estaciones libre de árboles que dificulten la medición de vientos y demás variables meteorológicas.

Los sistemas de medición de precipitación se hicieron a través de un convenio con el IDEAM quien realizó la instalación y opera la red, sin embargo, gran parte de la misma se encuentra fuera de servicio por vandalismo.

No se realizan lecturas manuales. Las frecuencias de transmisión de caudalímetros es cada 5 minutos, al igual que niveles y porcentaje de apertura de compuertas.

La información de la estación meteorológica, si bien las variables medidas no se reportan al administrador del sistema, es cada 10 minutos.

4.7.7. Proceso de verificación y calidad

Los mantenimientos se contratan con un tercero. El mantenimiento para el sistema de medición de nivel del embalse es preventivo. De igual manera se tiene un procedimiento para mantenimiento reactivo en caso en que los dos sensores de nivel lleguen a fallar antes del mantenimiento programado. Se realiza mantenimiento periódico siguiendo las recomendaciones del fabricante. El mantenimiento consiste básicamente en limpieza de tuberías y verificación estructural del cableado.

En el caso del sistema de medición de descargas turbinadas el mantenimiento preventivo se realiza siguiendo las recomendaciones del fabricante. Consiste básicamente en limpieza de los sensores y en la corrida de un software que muestra la integridad de los equipos a partir de los valores reportados.

Dentro del plan de mantenimientos anuales de la CH Urrá se incluye el mantenimiento de los sistemas de medición de las variables operativas y otras variables meteorológicas. Estos mantenimientos, a pesar de realizarse con recursos propios, se contratan con terceros, normalmente con las mismas firmas proveedoras. Hay una estación meteorológica propiedad del IDEAM cerca al edificio de control cuyo mantenimiento realiza anualmente directamente ese instituto.

Aparte de los programas de mantenimiento no se realiza una auditoría interna de los datos recibidos.

Dentro de los primeros cinco días de cada mes se verifica por parte del grupo de hidrología que la información reportada en Neptuno coincida con la almacenada en los servidores. Para esto se usa una plantilla en Excel. En caso de encontrarse un error se procede a corregir la información cargada en Neptuno ya que por regulación existe una ventana en los primeros siete días de cada

mes para realizar esta corrección. De igual manera, en el primer mes de cada año se hace el mismo tipo de verificación realizada mensualmente, con el objeto de realizar el reporte de caudales medios mensuales antes del 31 de marzo de cada año.

El anterior procedimiento no presenta mayores complicaciones y que actualmente no se cuenta con estaciones hidrométricas para estimar los aportes, lo que simplifica la gestión de la información, su verificación y corrección.

4.8. Conclusiones y resumen comparativo

Se realizó una revisión y referenciamiento de los sistemas de monitoreo hídrico de los países seleccionados por el CNO por su alto porcentaje de energía hidroeléctrica en la composición de su matriz de generación para el desarrollo de este proyecto. Si bien se hizo énfasis durante la búsqueda de información en la medición de las variables hídricas asociadas a la operación de centrales hidroeléctricas, solo en el caso de Brasil se identificó un reglamento de medición para los operadores de este tipo de plantas.

En el caso Brasileiro, los *Procedimientos de la Red* en el *Módulo 9 - Recursos hídricos y meteorología* establece las responsabilidades y procesos para la obtención de los datos hidrológicos, hidroenergéticos y meteorológicos asociados a la operación de centrales hidroeléctricas. De igual forma la Resolución Conjunta de la Agencia Nacional de Agua - ANA y ANEEL número 03 y el documento *ORIENTAÇÕES PARA OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS* de la ANA estandarizan los procesos de medición de las variables de interés.

En los demás casos, a partir de los documentos consultados, se evidenció que los países consultados tienen complejas redes hidrométricas para la caracterización de sus recursos en tiempo real. Las mediciones están basadas en métodos que permiten el registro y transmisión de manera automática a bases de datos centrales de análisis, almacenamiento y publicación. Además, los países consultados cuentan con modelos hidrológicos complejos y completos que utilizan la información recolectada para su calibración.

En los países estudiados, los datos recopilados en tiempo real se utilizan para monitorear el estado de las cuencas, predecir crecientes, inundaciones, monitorear el estado de calidad del agua y garantizar el cumplimiento de los límites impuestos al uso del agua por agencias reguladoras. *Es decir tienen múltiples propósitos en el monitoreo y control del uso del recurso hídrico.*

Los servicios hidrológicos o entes responsables monitorean de manera continua los datos recolectados para verificar su calidad, mediante la aplicación de varios niveles de verificación.

En Colombia existe una red hidrológica administrada por el IDEAM. La entidad administra la base de datos HYDRAS mediante la cual se monitorea en tiempo real el estado de las principales cuencas del país.

Los Agentes Generadores en Colombia han implementado sistemas de medición de las variables hídricas siguiendo los estándares internacionales y documentos de buenas prácticas, así como recibiendo asesoría de empresas especializadas en el área. Sin embargo, en algunos casos, limitaciones técnicas o prácticas han dificultado la implementación de algunas de las mediciones. La Figura 4 muestra un cuadro comparativo que resume las mejores prácticas de los Agentes de generación en Colombia y las compara con el caso Brasileiro, siendo este el único “Reglamento de Medición” identificado en la revisión.

Medición de variables hídricas asociadas a plantas de generación hidroeléctricas Octubre de 2020

	Aportes	Aforos líquidos	Vertimientos y descargas	Caudal Turbinado	Tiempo Real	Aseguramiento Calidad
Brasil - ONS	Calculado por balance hidráulico como se explica en el Manual de Procedimientos da Operação [34]	Se recomiendan métodos acústicos. Al menos cuatro (4) aforos al año.	Se reporta como parte de las variables operativas.	Se reporta como parte de las variables operativas.	Transmisión de variables operativas en resolución horaria.	Aseguramiento de calidad en tres niveles. Responsabilidad de agentes generadores y ONS. El ONS solicita a los agentes de generación información que sustente la definición y aplicación de metodologías para la verificación y consolidación de datos.
EPM	En EPM la determinación del aporte a los embalses se realiza con base en diversas metodologías que siguen las recomendaciones del Acuerdo CNO 917 del 01 de diciembre de 2016 como son: Factor de área, Regresión y Balance.	En condiciones regulares se desarrolla un programa de cuatro (4) aforos por año para cada estación. Cuando se detecta que alguna estación se encuentra descalibrada se procede a realizar un mayor número de aforos con el objeto de realizar una nueva curva de calibración. Principalmente se utiliza ADCP.	Estimados a partir de curvas de calibración expresadas en función del nivel del embalse y la apertura de las compuertas, si están presentes. Las descargas no turbinadas se estiman mediante diversos equipos o procedimientos como el caudalímetro o sensor de caudal fijo, estación limnimétrica localizada en el canal de descarga y en casos particulares como válvulas o compuertas también puede estimarse con base en la cota del embalse y el porcentaje de apertura de la válvula o de la compuerta y la curva de calibración.	Medición mediante equipos ultrasónicos. Verificación mediante la comparación con datos de generación. Otras opciones incluyen estación limnimétrica localizada en el canal de descarga para el registro del nivel y la correspondiente curva de calibración obtenida con base en aforos. También se usa el factor de conversión, cuando no se dispone de las anteriores alternativas o sus medidas presentan fallas.	Se tienen tiempos de recepción desde conexiones de tiempo real hasta recepciones horarias. Los registros en la base de datos generalmente son cada 5 minutos, con algunos casos de registro cada minuto	Tienen implementado un proceso de mejora continua para la verificación y aseguramiento de la calidad de los datos. El proceso involucra procedimientos de mantenimiento preventivo y correctivo, y calibración de instrumentos. Cuentan con software especializado para el archivo y análisis de los datos.
Lareif	Los aportes son medidos mediante la estación limnimétrica ubicada aguas arriba del lugar de captación.	Mediciones mediante ADCP o correntómetros. Inicialmente se realizan en todo el rango de niveles del río. Luego, cada 3 meses.	Determinados mediante la medición del nivel sobre el azud y la correspondiente ecuación hidráulica de la estructura.	Medición mediante equipos basados en presión. Verificación mediante medición con equipos ADCP o correntómetros.	Registro de los datos de nivel cada 10 minutos y transmisión vía señal celular.	Cuentan con consultores externos encargados del diseño e implementación de las estaciones de medición, y para el control de calidad del proceso de medición y los datos. Mantenimientos preventivos y correctivos. Cuenta información y caudal a través del portal Aquatick, pero la información hidrológica se consolida en base de datos en Excel.
ISAGEN	Con la información de caudales de cada río se crea la serie de afluentes de la central, ya sea la serie natural o serie total, utilizando la metodología de factores de área. Se tiene un acuerdo que aplica a cada central de ISAGEN tanto para la metodología del cálculo de la serie natural en resolución mensual como la estimación de caudales operativos que reportan al CND diariamente.	Se realizan aforos mediante un contratista. El periodo varía entre 1 y 3 meses dependiendo de la estabilidad de la sección hidráulica. Existen planes de aforos que se pueden ajustar según necesidad. Se requiere del uso de ADCP aunque en algunos casos se usan correntómetros.	Mediciones con base a estaciones limnimétricas o ecuaciones hidráulicas de estructuras de descarga.	Medición mediante sensores de ultrasonido en tuberías de carga ya sea tipo clamp-on o intrusivos en el caso de centrales nuevas. En algunos casos se cuenta con estaciones hidrométricas que permiten la validación de los datos.	Datos hidrométricos llegan a software AQUARIUS en resolución 10 minutas.	Sistema basado en estándares de IDEAM. Se tiene un contrato con tercero encargado de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo. Verificación en campo de los equipos de medición. Control de calidad mediante herramientas de software AQUARIUS.
Celsia	En algunos casos se usan estaciones limnimétricas con mediciones continuas de caudal. Sin embargo, en la mayoría de las centrales Celsia usa el balance hídrico para determinar los aportes.	Aforos utilizando sistemas ADCP en periodo de al menos uno mensual.	Estimados a partir de curvas de calibración expresadas en función del nivel del embalse y la apertura de las compuertas. En algunos casos se han verificado las curvas con mediciones en modelos físicos a escala o mediante modelos computacionales.	En la mayoría usa el método de transformación del factor de conversión (FC) en agua siguiendo los protocolos establecidos por el CNO.	La frecuencia de recolección de información es minutas, mientras que la de transmisión depende de las características de la estación (ubicación) y van desde cada 5 minutos hasta 3 horas.	Sistema de medición basado en referencias de la WMO e IDEAM, así como normal técnicas de otros países. Tercerización de la instalación de sensores y estaciones de medición. Se cuenta con un proceso básico de verificación de los datos. Plan de mantenimiento y calibración de instrumentos.
ENEL	En algunos casos se usan estaciones limnimétricas con mediciones continuas de caudal. En otros casos se usa el balance hídrico para determinar los aportes.	Se realizan aforos mediante el método del vadeo, el método por suspensión de poleas. En algunos casos se usan sensores de efecto Doppler. La periodicidad es variable, puede ser quincenal, mensual o bimensual, dependiendo de las condiciones hidráulicas del lugar.	El cálculo de los vertimientos por borde libre se basa en el nivel medido del embalse y las curvas de descarga establecidas en el diseño. Para los vertimientos y descargas por compuertas, se tienen establecidas curvas o tablas de caudal en función del nivel del embalse y la apertura de las compuertas, determinadas mediante estudios hidráulicos.	Se encuentra en la transición de estimaciones de caudal turbinado a partir de Factor de Conversión (FC) o curvas colina a caudalímetros. No se establecen las características.	La red de estaciones hidrométricas transmite los datos en resolución horaria o menor (15 minutos) de manera automática.	Sistema de medición basado en estándares de la WMO e IDEAM dando cumplimiento a requerimientos establecidos por CREG y CNO. Se cuenta con un contrato de operación, mantenimiento preventivo y correctivo, que incluye la recopilación, procesamiento y entrega de datos de la red de las estaciones hidrometeorológicas.
AES	Las estaciones principales con las que se calcula el aporte al Embalse La Esmeralda, cuentan con un sistema telemétrico, el cual registra datos cada hora y es procesado mediante el sistema de transmisión GOES.	Realizado por terceros con equipos de medición propiedad AES. Aforos mensuales en cada uno de los ríos afluentes al embalse.	Vertimientos son estimados a partir de la curva de descarga de las compuertas.	Estimados a partir de la generación y el factor de conversión. Se cuenta con un sensor de ultrasonido ubicado en las tuberías de carga.	Mediciones con resolución horaria.	Verificación de las mediciones automáticas mediante observadores en campo.
Urrá	Los aportes se estiman a partir de balance hídrico. El nivel del embalse se mide a través de sensores de presión. En el pasado se instalaron algunas estaciones hidrométricas que luego fueron vandalizadas.	N.A.	Las descargas por rebosadero y descarga de fondo se estiman a partir de las ecuaciones de calibración suministradas por los fabricantes.	Las descargas turbinadas se miden con sensores de ultrasonido de 8 vías.	Transmisión de información con periodo de 5 minutos para datos de caudalímetros, niveles y porcentaje de apertura de compuertas. Las estaciones meteorológicas reportan cada 10 minutos.	Fuera de las batimetrías, las cuales se realizan de acuerdo con la periodicidad establecida por el Acuerdo del CNO, no se realizan verificaciones a los sistemas de medición. En el pasado se realizaron algunos aforos para verificar las descargas turbinadas.

Figura 4: Resumen comparativo de mejores prácticas de los Agentes Generadores en Colombia.

Basado en la información suministrada por los agentes para el desarrollo de este proyecto.
Universidad de los Andes - Consejo Nacional de Operación

Referencias

- [1] «The 5 Essential Elements of a Hydrological Monitoring Programme», *World Meteorological Organization*. <https://public.wmo.int/en/bulletin/5-essential-elements-hydrological-monitoring-programme>, nov-2015.
- [2] Ø. A. Tilrem, *Methods of Measurement and Estimation of Discharges at Hydraulic Structures*. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1986.
- [3] Organización Meteorológica Mundial, *Guía de prácticas hidrológicas vol 1*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, 2011.
- [4] Organización Meteorológica Mundial, *Guía de prácticas hidrológicas vol 2*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, 2011.
- [5] *Technical Regulations: Volume III: Meteorological Service for International Navigation*. Geneva: Secretariat of World Meteorological Organization, 1988.
- [6] WMO, «MANUAL ON STREAM GAUGING Vol. 1». 2010.
- [7] *Manual on Stream Gauging Vol. 2*. Geneva: World Meteorological Organization, 2010.
- [8] J. M. Fullford y Z. Buzás, «SURVEY ON FIELD DISCHARGE MEASUREMENT INSTRUMENTATION AND TECHNIQUES USED OPERATIONALLY». 2009.
- [9] M. Muste, «Guidelines for the Assessment of Uncertainty of Hydrometric Measurements». 2009.
- [10] World Meteorological Organization, *Technical Material for Water Resources Assessment*. Geneva: World Meteorological Organization, 2012.
- [11] 14:00-17:00, «ISO 18365:2013 Hydrometry Selection, Establishment and Operation of a Gauging Station». 2013.
- [12] ISO, «ISO 3455:2007 Hydrometry Calibration of Current-Meters in Straight Open Tanks». 2007.
- [13] Svenska Institutet för Standarder, «Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats (ISO 748:2007)». 2007.
- [14] J. L. Coz, «A Literature Review of Methods for Estimating the Uncertainty Associated with Stage-Discharge Relations», p. 21.
- [15] 14:00-17:00, «ISO 7066-2:1988». 1988.
- [16] 14:00-17:00, «ISO 5168:2005». 2005.
- [17] P. M. Pelletier, «Uncertainties in the Single Determination of River Discharge: A Literature Review», *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 15, n.º 5, pp. 834-850, oct. 1988.
- [18] D. P. Turnipseed y V. B. Sauer, «Discharge Measurements at Gaging Stations». U.S. Geological Survey USGS, 2010.

[19] 14:00-17:00, «ISO 748:2007». 2007.

[20] 14:00-17:00, «ISO 1088:2007». 2007.

[21] M. R. Simpson, «Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler», United States Geological Survey, Open-File Report, 2001.

[22] 14:00-17:00, «ISO/TR 24578:2012». 2012.

[23] A. Adamkowski, W. Janicki, Z. Krzemianowski, y M. Lewandowski, «Flow Rate Measurements in Hydropower Plants Using the Pressure-Time Method Experiences and Improvements», *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 68, p. 101584, ago. 2019.

[24] «Qué es una batimetría y cuáles son sus aplicaciones?», *Comunidad ISM*..

[25] O. H. I. (OHI), «Normas De La Ohi Para Los Levantamientos Hidrograficos», International Hydrographic Bureau, Monaco, Publicación Especial No. 44, 5a edición.

[26] G. Sopó, O. Martínez, y A. Herreño, «METODOLOGÍA PARA REALIZAR TRABAJOS DE HIDROTOPOGRAFÍA». IDEAM.

[27] «Protocolo de Monitoreo Del Agua». IDEAM, 2017.

[28] WMO, *Guidelines for the Assessment of Uncertainty for Hydrometric Measurement*. 2017.

[29] A. N. de Águas, «Sistema Interligado Nacional», *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios*. <https://www.ana.gov.br/sar/sin/sistema-interligado-nacional>.

[30] «ONS - Operador Nacional Do Sistema Eléctrico». <http://www.ons.org.br/>.

[31] ONS, «Submódulo 9.1 Recursos Hídricos e Meteorologia: Visão Geral». ene-2017.

[32] ONS, «Submódulo 9.2 Acompanhamento, Análise e Tratamento Dos Dados Hidroenergéticos Do Sistema Interligado Nacional». dic-2019.

[33] ONS, «Submódulo 2.7 Requisitos Mínimos de Supervisão e Controle Para a Operação». mar-2020.

[34] ONS, «Submódulo 10.22 Manual de Procedimentos Da Operação». ene-2020.

[35] ONS, «Submódulo 23.5 Critérios Para Estudos Hidrológicos». dic-2019.

[36] ASCOM, «Represas y embalses - Agencia Nacional de Agua y Saneamiento». <https://www.ana.gov.br/regulacao/saiba-quem-regula/reservatorios>.

[37] A. N. de Águas, «Home SAR», *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios*. <https://www.ana.gov.br/sar/home-sar>.

[38] «RESOLUÇÃO CONJUNTA No 3 ANEEL - ANA». p. 6, ago-2010.

[39] Agência Nacional de Águas - ANA, «ORIENTAÇÕES PARA OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS». 2012.

[40] F. Olsson y M. Pearson, «Modeling the Total Inflow Energy to Hydropower Plants - a Study of Sweden and Norway». 2005.

[41] I. Enjebo, «Inventory of Hydrological Measurements in Sweden», Tesis doctoral, Uppsala Univesitet.

[42] C. Scholtz, «Vattenförvaltningen i Sverige och Alsterån. Överensstämmer äldre vattenrättsliga tillstånd med nutidens miljökrav?», Tesis doctoral, Uppsala Univesitet, 2011.

[43] «The Legal Framework», *Energifakta Norge*. <https://energifaktanorge.no/en/regulation-of-the-energy-sector/det-juridiske-rammeverket/>.

[44] «Hydrology - NVE». <https://www.nve.no/hydrology/>.

[45] «Stasjonsnettet - NVE». <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-og-vannforing/stasjonsnettet/>.

[46] «Målinger Og Metoder - NVE». <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-og-vannforing/malinger-og-metoder/>.

[47] E. and C. C. Canada, «Weather: Service Standards», *aem*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/meteorological-service-standards.html>, nov-2013.

[48] E. and C. C. Canada, «Hydrometric Data and Information Service Standards», *aem*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/meteorological-service-standards/publications/hydrometric-data-information.html>, may-2015.

[49] E. Canada, «Model Class Screening Report for Hydrometric Station Projects in Ontario Region». 2011.

[50] E. and C. C. Canada, «National Water Data Archive: HYDAT», *aem*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/quantity/monitoring/survey/data-products-services/national-archive-hydat.html>, feb-2010.

[51] E. and C. C. Canada, «Technical Documentation: Hydrometric Archive», *aem*. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/display-download/technical-documentation-hydrometric-archive.html>, oct-2018.

[52] «HYDROMETRIC FIELD MANUAL MEASUREMENT OF STAGE». Environment Canada.

[53] E. Canada, «Hydrometric Manual Data Computations». 2012.

[54] «Centre d'expertise Hydrique Du Québec (CEHQ) - Page d'accueil». http://www.cehq.gouv.qc.ca/index_en.asp.

[55] politis, «Hydroelectricity in Quebec», *Canadian Geographic*. <https://www.canadiangeographic.ca/article/hydroelectr-quebec>, may-2016.

[56] R. Ferreira y E. Maia, «HYDRO-QUÉBEC'S CONTINUOUS FLOW MEASUREMENT SYSTEM: DEVELOPMENT OF AN INDUSTRIAL PROTOTYPE», *PCHN*, vol. 66, n.º 17, pp. 19-21, sep. 2015.

- [57] G. Proulx, D. Lemon, y L. Martell, «Turbine Flow Measurement in Low-Head Plants Hydro-Québec's and Corps of Engineers' Experience with ASFM: Continuous Flow Monitoring», p. 7.
- [58] «Technical Requirements for the Connection of Generating Stations to the Hydro-Québec Transmission System». 2019.
- [59] «Hydrometeorologic Data». <https://www.bchydro.com/energy-in-bc/operations/transmission-reservoir-data/hydrometeorologic-data.html>.
- [60] Province of British Columbia, «Water Use Plan Guidelines». 1998.
- [61] Ministry of Environment, «Manual of British Columbia Hydrometric Standards». 2009.
- [62] «RISC Hydrometric Standards Review». <https://www.ae.ca/projects/details/risc-hydrometric-standards-review>.
- [63] S. Polhorsky y P. Kicking, «COMMON UNDERSTANDING ON SURVEYING ACTIVITIES HYDROGRAPHY & HYDROLOGY», NETWORK OF DANUBE WATERWAY ADMINISTRATIONS, 2011.
- [64] M. y E. A. (. Instituto de Hidrologia *etal.*, *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia, 2007.
- [65] «MEJORES PRÁCTICAS PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES HÍDRICAS OPERATIVAS», EPM, ago. 2020.
- [66] «PRÁCTICAS PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS HÍDRICAS», LAREIF, GUI-OPR-004, sep. 2020.
- [67] «REPORTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS DE LOS AGENTES GENERADORES DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS HÍDRICAS», ISAGEN S.A. E.S.P., 2020.
- [68] «REPORTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS DE LOS AGENTES GENERADORES DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS HÍDRICAS.», Celsia S.A., 2020.
- [69] «Reporte De Las Mejores Prácticas De Los Agentes Generadores Del Sistema Interconectado Nacional Para La Medición De Variables Operativas Hídricas», ENEL - Emgesa.
- [70] «REPORTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS DE LOS AGENTES GENERADORES DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS HÍDRICAS», AES COLOMBIA.
- [71] «REPORTE DE LAS MEJORES PRÁCTICAS DE LOS AGENTES GENERADORES DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS HÍDRICAS», CENTRAL HIDROELÉCTRICA URRÁ, 2020.