

“Cuantificación de las Incertidumbres Asociadas a los Balances Energéticos del SIN”

INFORME EJECUTIVO

Entidad Interesada:

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN - CNO

Entidad Ejecutora:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN

Director del Proyecto:

JAIME IGNACIO VÉLEZ UPEGUI

FACULTAD DE MINAS

23 de mayo de 2019

Medellín

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ALCANCE A	3
2.1	MÉTODO ACTUAL DE CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA – DESBALANCE.....	3
2.2	FUENTE DE INCERTIDUMBRE DEL BALANCE ENERGÉTICO – DESBALANCE.....	4
2.2.1	FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES EN MASA 4	
2.2.2	FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA FORMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO ACTUAL	8
2.2.3	CONCLUSIONES.....	19
2.3	RANGOS DE INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES DEL BALANCE ENERGÉTICO – DESBALANCE A PARTIR DEL BALANCE DE MASAS.....	21
2.4	DESBALANCE ENERGÉTICO POR PLANTAS EN EL AÑO 2017.....	22
3.	ALCANCES C, D Y E	24
3.1	DEFINICIONES.....	24
3.2	VARIABLES REQUERIDAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y BALANCE DE ENERGÍA DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN CON TECNOLOGÍA HIDRÁULICA.....	24
3.3	BALANCE DE ENERGÍA – DESBALANCE	27
3.3.1	OBJETIVO DEL DESBALANCE	27
3.3.2	UNIDAD DE ANÁLISIS Y PLANTAS.....	28
3.3.3	VARIABLES REQUERIDA	28
3.3.4	CONTENIDO ENERGÉTICO DEL AGUA - FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO	28
3.3.5	BALANCE DE ENERGÍA.....	29
3.3.6	ESCALA TEMPORAL DE ESTIMACIÓN	30
3.3.7	INDICADORES DE SEGUIMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	30
3.4	ENERGÍA ALMACENADA EN EL SIN	31
4.	ALCANCE G.....	33
5.	ALCANCE H.....	37
5.1	USO ACTUAL DEL DESBALANCE ENERGÉTICO POTENCIAL EN LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO ENERGÉTICO DEL SIN	37

5.2	CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DEL DESBALANCE ENERGÉTICO POTENCIAL DIARIO EN LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO	38
5.2.1	LAS CARACTERÍSTICAS DEL DESBALANCE	38
5.2.2	ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DEL DESBALANCE ENERGÉTICO DEL SIN	39
5.3	CONCLUSIONES.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del aporte hídrico a partir de medición en estaciones hidrométricas.....	6
Figura 2.	Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del volumen de reservas hídricas.	6
Figura 3.	Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la cuantificación del caudal turbinado estimado a partir de medición directa.	7
Figura 4.	Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la cuantificación del caudal turbinado estimado a partir del factor de conversión y la medición de la potencia/energía eléctrica.....	7
Figura 5.	Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del caudal vertido....	8
Figura 6.	Esquema conceptual de tránsito del agua entre embalses en cadena.	14
Figura 7.	Cadena Pagua (ENEL/EMGESA) – Configuración esquemática del sistema. Fuente: ENEL/EMGESA.....	15
Figura 8.	Desbalance diario actual y con restricciones físicas de la cadena Pagua durante el año 2017.	16
Figura 9.	Cadena Guatron (EPM) – Configuración esquemática del sistema. El contorno rojo señala la conducción desde la Bocatoma Tenche hacia el embalse Troneras. Fuente: modificado de EPM.	17
Figura 10.	Propuesta de análisis del Factor de Conversión hidráulico.	29
Figura 11.	Modelo conceptual de la inclusión actual de los desbalances en los modelos de planeamiento energético SDDP del SIN	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Centrales con inconsistencias en los registros de vertimientos en masa y energía.....	9
Tabla 2.	Desbalances estimados para la cadena Pagua con la metodología actual e incluyendo restricciones físicas.	16

Tabla 3. Desbalance calculado con el método actual y calculado incluyendo descargas no turbinadas y con el término de energía turbinada, definido como el producto del caudal turbinado y el factor de conversión.	19
Tabla 4. Comparación intercepto y pendiente.....	23
Tabla 5. Métodos de medición o estimación de los términos ingresados al Balance Hídrico en las centrales de interés del proyecto. Fuente: Cuestionarios enviados por los agentes.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En este informe se presentan el informe ejecutivo del contrato N° 732-1864 CNO Eléctrico, firmado entre La Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y la Alianza Fiduciaria S.A.

El contrato tuvo ocho (8) alcances, entre ellos uno de los cuales correspondió a la socialización del informe final a diferentes entes del sector. Los resultados del proyecto se estructuraron en un total de cinco (5) informes finales con anexos, y algunos de ellos con respuestas a inquietudes de los integrantes del SURER; los alcances c, d y e fueron presentados en un único informe. A continuación, se listan los alcances del contrato:

a. Estimar los rangos de incertidumbre asociados a cada una de las variables que intervienen en el cálculo de los balances de energéticos, considerando el tipo de variable y la metodología actual de cálculo de estos, según la información suministrada por el contratante.

c. Explorar ajustes a la metodología utilizada en el sector para el cálculo de los balances energéticos, o proponer un nuevo procedimiento, en caso que lo considere pertinente. Esta exploración o nueva propuesta debe tener como resultado complementario la obtención de un método de seguimiento a la estimación del balance energético.

d. Elaborar un informe donde se describan los análisis realizados para la cuantificación de la incertidumbre asociada a cada variable, la determinación del rango normal en el cual se puede mover dicha incertidumbre para cada planta dependiendo de los criterios que se hayan identificado, el rango de la incertidumbre asociada al balance energético agregado del sistema y las conclusiones y recomendaciones del Contratista con base en los resultados y la información analizada.

e. Definir un indicador para hacer seguimiento periódico al balance hidro-energético.

f. Revisar y proponer mejoras al protocolo de factor de conversión que está en proceso de revisión por parte del CNO, con miras a tener una mejor representación de la energía equivalente a las reservas hídricas y demás términos empleados en los balances hidro-energéticos.

g. Revisar y proponer mejoras en los métodos de cuantificación del recurso hídrico y en el reporte y actualización de la información hidrológica operativa diaria.

h. Proponer una metodología para representar los rangos de las incertidumbres asociadas a los balances energéticos en los modelos de despacho hidrotérmico empleados para el planeamiento energético.

i. Presentar los resultados finales del estudio al Subcomité Hidrológico, al Comité de Operación y al CNO. Esta presentación se deberá realizar en las oficinas del CNO en Bogotá.

2. ALCANCE A

En este capítulo se presenta el método de cálculo actual de balance de energía, se analizan las fuentes de incertidumbre del balance de energía donde se describen las fuentes de incertidumbre del balance de energía – desbalance, partiendo desde la medición de cada variable del balance de masa, hasta las existentes por la aplicación del método actual, analizando las fuentes de incertidumbre y/ error de la implementación del método actual. Finalmente se realiza un ejercicio de análisis cuantitativo de la incertidumbre de las variables que intervienen en el balance energético – desbalance y la comparación de los ajustes en masa y energía ante algunos escenarios de las fuentes de incertidumbre del método actual.

2.1 MÉTODO ACTUAL DE CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA – DESBALANCE

El método actual para el cálculo del balance de energía se basa en la propuesta realizada por Arvanitidis y Rosing (1970) en el artículo “*Composite Representation of a Multireservoir Hydroelectric Power System*”. En dicha publicación se propone un modelo para representar un sistema hidroeléctrico de múltiples embalses como un único embalse, para ser utilizado como una herramienta de apoyo para el planeamiento energético y aplicable en principio en una *escala temporal mensual*. El modelo explícitamente establece que está orientado hacia la estimación de la *energía potencial* para aprovechamiento del sistema de múltiples embalses, representados como un único embalse.

La energía potencial de agua almacenada en un embalse en particular se obtiene multiplicando el volumen de agua de dicho embalse por la suma de los factores de conversión de la planta asociada y de las plantas ubicadas aguas abajo.

Los autores mencionan que la metodología también es válida para embalses o centrales individuales aisladas.

Según las mesas de trabajo realizadas, en la actualidad se tiene que el método de cálculo se basa en la formulación en términos de energía potencial de Arvanitidis y Rosing (1970). Dentro del desarrollo del proyecto se recibieron diferentes documentos soporte sobre la implementación del método de balance de energía- desbalance, a continuación, se resumen de manera cronológica las fuentes de información relacionadas con la descripción.

1. Presentación del año 2010. Análisis de desviaciones en el Balance Energético diario del SIN. Año 2010. Fuente: XM. Fecha de recepción: 19 de diciembre de 2018, información entregada por EPM.
2. Archivo de Excel (“Anexo E – Desbalances Sistema.xls”) descriptivo del cálculo del desbalance. Año 2018. Fuente: XM. Fecha de recepción: 13 de agosto de 2018.
3. Archivo de Power Point “Demostración balance energético de cadena.pptx”. Año 2018. Fuente: XM. Fecha de recepción: 16 de noviembre de 2018.
4. Documentos de la metodología base. Fecha de recepción: 18 de diciembre de 2018:
 - “Composite Representation of a Multireservoir Hydroelectric Power System”. Arvanitidis y Rosing (1970).
 - “Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Produção de Energia Elétrica”. Gonçalves Lopes y Leme de Barros (2009).
 - “Submódulo 23.5 Criterios para estudos hidrológicos”. Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2017).
5. Documento “Metodología para la estimación de los desbalances energéticos del SIN.pdf” en borrador. Año 2019. Fuente: XM. Fecha de recepción: 08 de marzo de 2019.

2.2 FUENTE DE INCERTIDUMBRE DEL BALANCE ENERGÉTICO – DESBALANCE

2.2.1 FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES EN MASA

En general, las fuentes de incertidumbre identificadas se pueden clasificar entre alguna de las siguientes clases generales:

Incetidumbre de la medición directa: se refiere a la incertidumbre propia del equipo con el cual se realiza una medición; generalmente es suministrada por el fabricante del equipo y corresponde a la precisión del mismo. Por ejemplo, la incertidumbre de un radar para medir el nivel de la superficie del agua, o de un molinete para medir la velocidad del flujo en un punto.

Incetidumbre metodológica: se refiere al error acumulado asociado al método con el cual se cuantifica una variable. Involucra la propagación del error de diferentes mediciones provenientes de instrumentos (con su propia incertidumbre), que son realizadas para obtener el dato final de la medición. Por ejemplo, el error asociado a la interpolación espacial de las mediciones de profundidad realizadas con un ecosonda para construir la batimetría de un embalse o el error asociado a un aforo líquido realizado con molinete, que involucra el cálculo de la velocidad media a partir de mediciones puntuales de velocidad realizadas en diferentes puntos.

Incetidumbre del ajuste estadístico: es la incertidumbre asociada a un ajuste estadístico entre un grupo de variables, con base en el cual se cuantifica una de ellas a partir de la medición directa de las otras. También incluye la incertidumbre asociada a la limitación en el rango de magnitudes y el

número de datos utilizados para la construcción de los ajustes. Por ejemplo, el ajuste estadístico construido entre el nivel del agua y el caudal que fluye a través de una sección transversal, que es utilizado para cuantificar el caudal líquido a partir de mediciones de nivel del agua.

Incertidumbre de la temporalidad de las mediciones: es la incertidumbre asociada a la vigencia de los métodos, ajustes y mediciones que son utilizadas para la cuantificación de alguna variable en la actualidad. Por ejemplo, la vigencia de una curva de ajuste del nivel del agua y el caudal en una sección de aforo o de la batimetría de un embalse.

Para el análisis de incertidumbre de la medición de cada una de las variables en masa sólo se contó con el reporte del dato de cada una de las variables, más no los equipos usados para su medición y sus respectivas precisiones, metodologías de medida y estimación de la magnitud, etc. Por esta razón sólo se presenta una descripción general del cómo debería medirse la incertidumbre según los métodos, dato que debe reportarse en conjunto con el valor a ser declarado para proceder a la propagación de errores desde la medida hasta la estimación del balance de masa y posterior balance de energía.

A continuación, se presentan los esquemas conceptuales de las fuentes de incertidumbre identificadas para cada una de las variables reportadas por los agentes como información operativa hidrológica, esto a partir de la información recibida de los reportes que hace cada agente para cada central y de la información recolectada mediante encuestas y/o entrevistas.

En la Figura 1 se presentan las fuentes de incertidumbre identificadas para la variable de aportes hídricos a las centrales y/o embalses.

En la Figura 2 se presentan las fuentes de incertidumbre identificadas para el volumen de reservas hídricas.

En la Figura 3 se presentan las fuentes de incertidumbre identificadas para la medición directa del caudal turbinado y en la Figura 4 para la estimación del mismo por medio del uso de la energía medida en el contador y el factor de conversión.

En la Figura 5 se presentan las fuentes de incertidumbre identificadas para los vertimientos de agua.

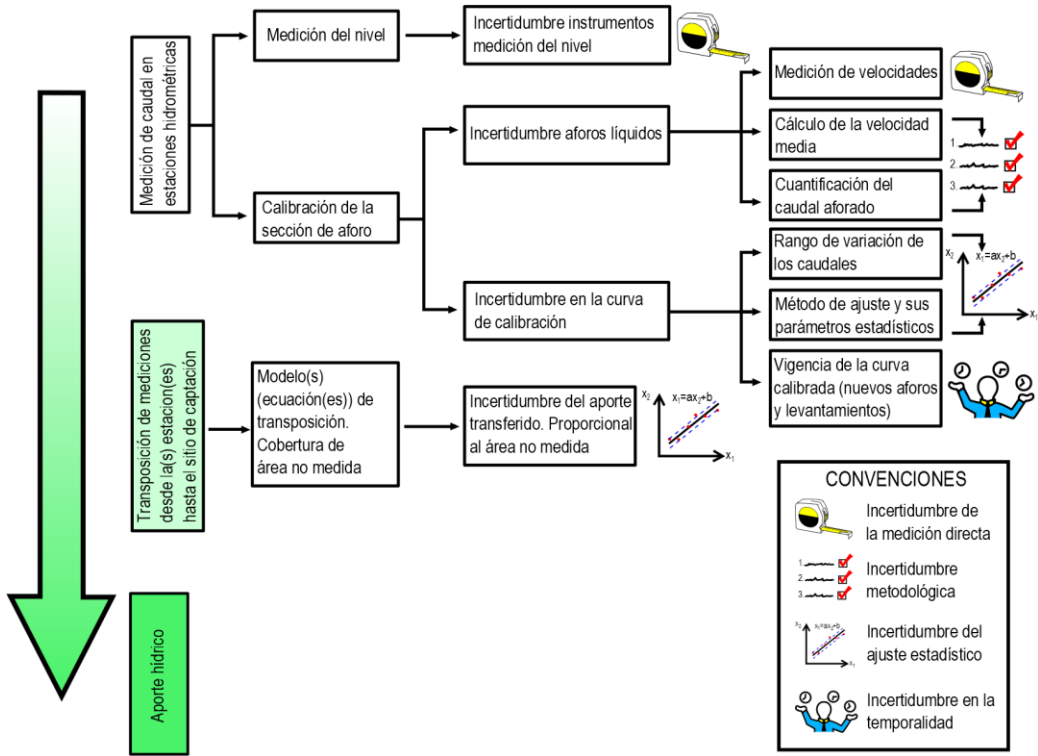


Figura 1. Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del aporte hídrico a partir de medición en estaciones hidrométricas.

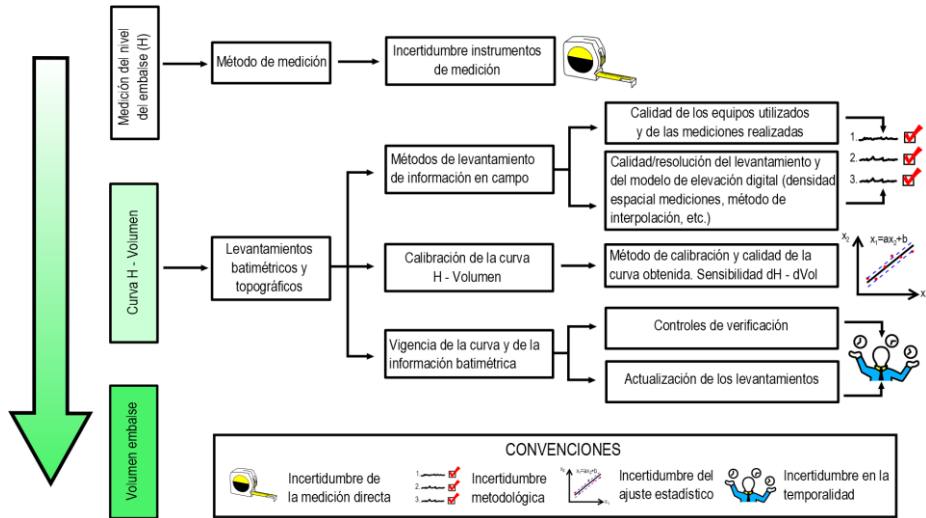


Figura 2. Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del volumen de reservas hídricas.

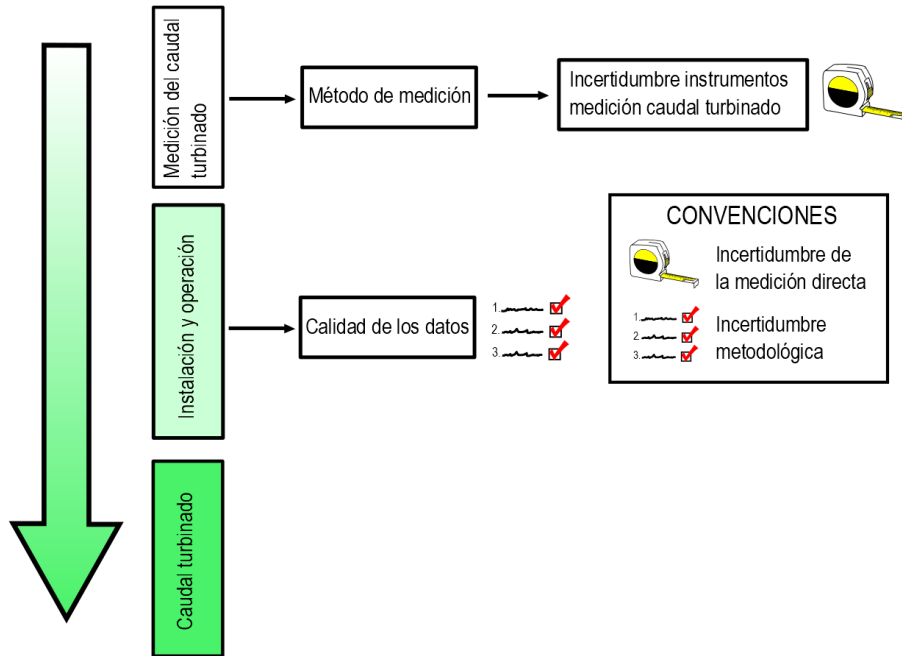


Figura 3. Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la cuantificación del caudal turbinado estimado a partir de medición directa.

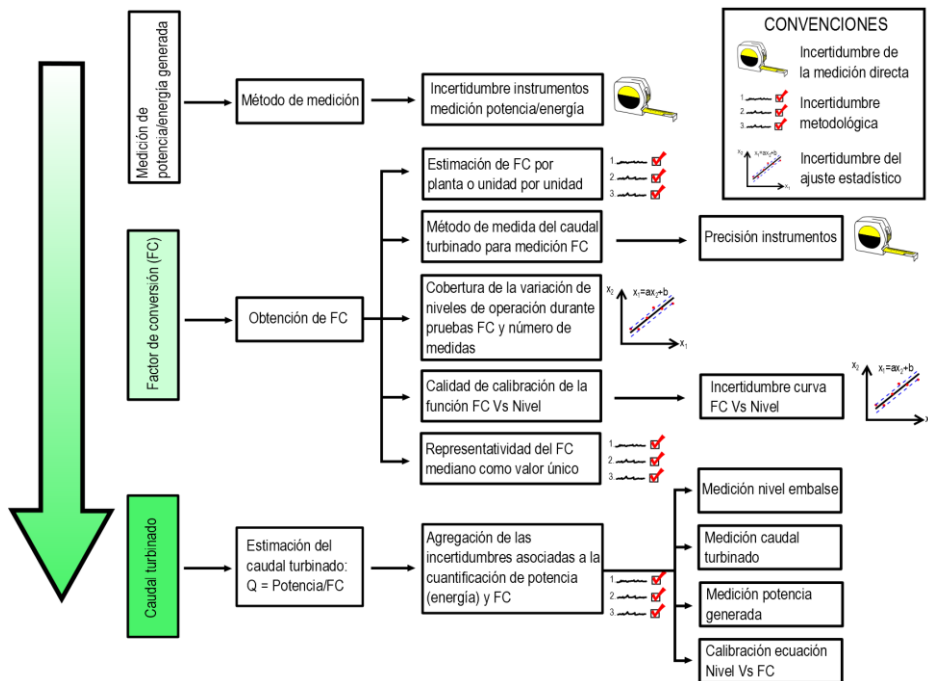


Figura 4. Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la cuantificación del caudal turbinado estimado a partir del factor de conversión y la medición de la potencia/energía eléctrica.

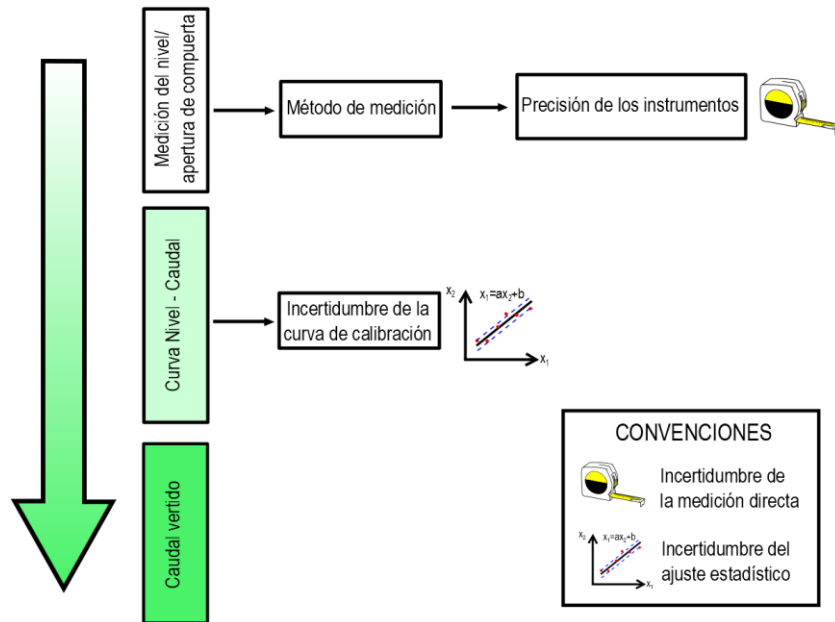


Figura 5. Esquema de fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del caudal vertido.

La incertidumbre de cada variable involucrada en el balance de energía – desbalance del SIN es el resultado de la propagación de errores desde las mediciones, siguiendo el método de manipulación de dichas mediciones orientadas al cálculo final de la variable. Así mismo, la incertidumbre del balance de energía – desbalance es el resultado de la propagación de errores de todas las variables que participan en su cuantificación. Por lo tanto, para cuantificar la incertidumbre del desbalance, es necesario contar con la incertidumbre propia de cada medición que se utiliza en el cálculo de este y un conocimiento completo de la metodología de medición y de manipulación de la información recolectada con el fin de propagar las incertidumbres iniciales. Para efectos del presente proyecto, aunque se contó con esta última información para los datos recientes, no se tuvo el registro histórico de estos métodos que permitiera llegar a la cuantificación esperada de la incertidumbre final.

2.2.2 FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LA FORMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO ACTUAL

En este numeral se resumen las fuentes de error e incertidumbre del balance de energía – desbalance producto del método de cálculo actual. Se incluyen las fuentes conceptuales de incertidumbre producto de la formulación del método actual y aquellas que son producto de la implementación de la metodología como tal. A continuación, se describe cada fuente de incertidumbre y la manera en la que esta se podría reducir en el desbalance.

2.2.2.1 Inconsistencias en la información base recibida

Se identificó que en algunas centrales existen inconsistencias en la simultaneidad del registro en unidades de volumen y energía de los caudales vertidos. Lo anterior se traduce en que en algunos días se reporta que hubo energía vertida mientras el volumen de agua vertido fue cero, o viceversa. En la Tabla 1 se resumen las centrales que muestran esta inconsistencia en el período 2017-2018.

Tabla 1. Centrales con inconsistencias en los registros de vertimientos en masa y energía.

Central	Año	Vertimiento en energía pero no en masa	Vertimiento en masa pero no en energía
Chivor	2018	09/06 - 10/06	-----
Guavio	2018	19/05 - 10/06	18/06 - 30/06
Jaguas	2018	15/04 - 06/05	15/05 - 01/06
Miel	2018	10/04 - 25/04	10/05 - 25/05
Playas	2018	05/04 - 08/04, 04/05 - 20/05	27/04 - 02/05, 05/06 - 19/06
Porce II	2018	09/04 - 06/05	09/05 - 05/06
Porce III	2018	10/04 - 09/05	10/05 - 08/06
San Carlos	2018	03/04	05/04
Sogamoso	2018	09/04 - 08/05	10/06 - 30/06
Troneras	2018	15/04 - 14/05	17/05 - 15/06

Estos hallazgos evidencian que es necesario realizar un control de calidad de la información a ser usada en el balance de energía, además de una revisión de los resultados de esta estimación en coherencia con el balance de masas. Además, se considera importante realizar un análisis de la calidad y consistencia de la información a ser utilizada en el cálculo del balance, con el fin de preservar la coherencia de los resultados del mismo.

2.2.2.2 Variabilidad en los factores de conversión

Se calculó el factor de conversión utilizado para estimar el contenido de energía (como la división entre el dato en energía y el correspondiente dato en masa) de cada variable del balance para las centrales aisladas individuales que no están en cadenas, con el fin de no incluir el análisis de los factores de conversión acumulados para la estimación del potencial en cadenas. Para este análisis, se estudiaron centrales con información completa de todas las variables. De acuerdo con el método actual, todas las variables excepto la generación, deben tener un factor de conversión mediano constante en el tiempo (según la vigencia de cada valor reportado) e igual al reportado por protocolo por cada operador. Sin embargo, se observó que no siempre se cumplió este comportamiento esperado al comparar los datos en la tercera y cuarta cifras decimales. Esto se evidencia en las siguientes situaciones:

1. El factor de conversión de los aportes no es constante en el tiempo y muestra una ligera variabilidad respecto al FC mediano (FC_m) oficial reportado por el operador y respecto al FC calculado para otras variables del balance.
2. Alrededor de las fechas de cambio del reporte del factor de conversión mediano, hay fluctuaciones entre el factor anterior y el nuevo que no coinciden con el único cambio reportado en el protocolo a partir de una fecha definida

A partir de esta estimación de los FC medianos para las variables que actualmente son convertidas de masa a energía, se observa que tienen una valoración energética distinta y además que la actualización del FC mediano en el cálculo no se hace simultáneamente para todas las variables.

Es importante destacar que en la mayoría de los casos el factor de conversión de la generación/turbinación difiere significativamente de los factores de conversión de las demás variables. Ya que el cálculo actual del balance de energía – desbalance se realiza utilizando la generación medida directamente de los contadores; estas diferencias en los FC mediano pueden tener un efecto importante en el desbalance ya que se traducen en una valoración energética del agua turbinada diferente a la de las demás variables. En el numeral 2.2.2.3 se analiza este aspecto con más detalle.

2.2.2.3 Desbalance calculado a partir de la medición directa de la energía generada

Como se describió en el numeral 2.1 el planteamiento base del método actual (Arvanitidis y Rosing, 1970) establece que el término de energía que sale se calcula como el producto de la masa de agua que sale del embalse (a través de turbinación y vertimientos) y el factor de conversión. Mediante esta formulación, el balance de masa se cumple tanto en embalses individuales como en embalses en cadena y a partir de éste se estima el balance de energía¹:

$$Vol_i \times FC_m = Vol_{i-1} \times FC_m + Aportes_{i-1} \times FC_m - Q_{T_{i-1}} \times FC_m - Ver_{i-1} \times FC_m \quad (1)$$

donde Vol_{i-1} y Vol_i son el volumen de embalse medido el día $i - 1$ y el día i , $Aportes_{i-1}$ son los aportes hídricos totales al embalse durante el día $i - 1$, $Q_{T_{i-1}}$ es el volumen turbinado durante el día $i - 1$, Ver_{i-1} es el volumen vertido durante el día $i - 1$ y FC_m es el factor de conversión mediano. Sin embargo, para el cálculo actual que se realiza del balance de energía diario, el planteamiento base

¹ Estrictamente, el balance de masa incluye el término de las descargas no turbinadas. Sin embargo, como es un tema de discusión central en otro apartado de este documento, no se incluye en esta parte.

no es aplicado estrictamente ya que el término de energía turbinada es reemplazado en la ecuación de desbalance por la generación medida directamente de contadores y reportada por los operadores (G):

$$Vol_i \times FC_m = Vol_{i-1} \times FC_m + Aportes_{i-1} \times FC_m - G_{i-1} - Ver_{i-1} \times FC_m \quad (2)$$

donde FC_m es el factor de conversión mediano. Según como se presentó en el numeral 2.2.2.2, el factor de conversión mediano “real” diario obtenido de la relación entre la generación G_i y el caudal turbinado Q_{T_i} difiere del factor de conversión mediano FC_m utilizado para convertir los demás componentes del balance hídrico a energía (aportes, volumen y vertimientos) y por lo tanto:

$$G_i \neq Q_{T_i} \times FC_m \quad (3)$$

Esta diferencia en la aplicación del método base introduce una fuente de error en el balance de masa teórico, que se refleja en el balance de energía – desbalance. Este desbalance inducido puede ser eliminado siguiendo estrictamente el planteamiento teórico en la práctica, lo cual se logra definiendo como energía turbinada la que resulta del producto $Q_T \times FC_m$, o utilizando un factor de conversión igual a todas las variables de la ecuación del balance de masas que incorpore la generación medida, como es el caso del aquí denominado Factor de Conversión Operativo (FCo).

La estimación actual del desbalance energético tiene una diferencia en la valoración energética del agua turbinada respecto a las demás componentes del balance hídrico y dicha valoración, además, cambia en el tiempo según el valor que va tomando día a día el factor de conversión operativo (G/Q_T) respecto al que se utiliza en las demás componentes (FC_m). Esta diferencia se traduce finalmente en la amplificación de la magnitud de los desbalances con respecto a los que están asociados al balance de masa convertidos a energía.

2.2.2.4 No inclusión de las descargas no turbinadas en el balance

Otra fuente de error identificada en el método, a partir de la revisión de la información base suministrada por XM consiste en que las descargas no turbinadas – DNT en algunas centrales se incluyen para realizar el balance hídrico, pero no se incluyen en el balance energético - desbalance. Esta discrepancia puede introducir diferencias importantes en el balance ya que no se estaría cumpliendo el mismo principio de conservación de masa en ambas ecuaciones (balance hídrico y energético).

2.2.2.5 Tiempos de viaje de aguas circulando en cadenas de embalses

La formulación actual del desbalance energético potencial diario en cadenas supone que el agua que es transferida de una central y/o embalse ubicado aguas arriba a otra ubicada aguas abajo a través de la turbinación y/o los vertimientos y/o las descargas no turbinadas llega en su totalidad al embalse localizado inmediatamente aguas abajo en el mismo período de tiempo en que fue descargada desde la central aguas arriba. La aproximación surge cuando al menos parte de la masa de agua que viaja entre embalses se encuentra circulando en el instante en el que se realizan las mediciones de volumen y caudales promedio de cada día.

Si bien toda el agua descargada en el período desde el embalse ubicado aguas arriba es contabilizada correctamente en el momento de realizar la medición del final del día, aquella puede no haber llegado en su totalidad al embalse aguas abajo (puede estar en tránsito), y por lo tanto puede no reflejarse en el cambio en el almacenamiento de este embalse al momento de la medición del volumen ni como un aporte al mismo. Sin embargo, el método actual de balance de cadenas, al considerar el balance de masa de toda la cadena como si fuera un solo embalse integrado, asume que la totalidad de las aguas descargadas desde el embalse aguas arriba ingresan en su totalidad al embalse aguas abajo en el período de análisis, de tal forma que el volumen del embalse de aguas abajo (Vol_{2f}) al final del período está dado por²:

$$Vol_{2f} = Vol_{2i} + Aportes_2 + Q_{T_1} + Ver_1 - Q_{T_2} - Ver_2 \quad (4)$$

Mientras que el volumen del embalse aguas arriba (Vol_{1f}) al final del período está dado por:

$$V_{1f} = V_{1i} + Aportes_1 - Q_{T_1} - Ver_1 \quad (5)$$

donde Vol_{1i}, Vol_{2i} son respectivamente, los volúmenes de los embalses aguas arriba y aguas abajo al inicio del período; $Aportes_1, Aportes_2$ son los aportes naturales de la hoya propia de los embalses de aguas arriba y aguas abajo respectivamente; Q_{T_1} y Ver_1 son respectivamente el caudal turbinado y vertido desde el embalse de aguas arriba y Q_{T_2} y Ver_2 son respectivamente el caudal turbinado y vertido en el embalse de aguas abajo. Esta aproximación lleva a que se contabilice una cantidad de

² “Demostración balance energético de cadena de dos elementos.pdf”. Fuente: XM, 2018

agua en la ecuación del balance que, en la situación real de las mediciones, aún no está presente y por lo tanto introduce una fuente de error para el balance de energía - desbalance.

En la Figura 6 se ilustra un escenario de tránsito del agua en una cadena simple de dos (2) embalses. En este ejemplo, se supone que el tiempo de viaje de la masa de agua descargada desde el Embalse 1 hacia el Embalse 2 es de cuatro horas. Bajo estas circunstancias, la masa de agua descargada desde el Embalse 1 a partir de las 20:00 horas del día i se encuentra aún en tránsito a las 00:00 horas del día siguiente, cuando se realiza la medición del volumen de ambos embalses y se cuantifica el promedio del día de los flujos a través de los embalses (aportes, turbinación y vertimientos). De esta manera, el caudal que ingresó al Embalse 2 producto de la operación del Embalse 1 será menor al caudal total descargado desde el Embalse 1 en el período pues durante las primeras cuatro horas del día i ingresó una cantidad menor de agua desde dicha central producto de la operación anterior a las 00:00 horas del día i . Esta diferencia, sin embargo, no es tenida en cuenta en el método actual en la que se modela la cadena como un único embalse en el que necesariamente supone que la totalidad de la masa de agua descargada desde la central 1 ingresa en el período de tiempo al Embalse 2, no siendo así.

Cabe mencionar que la metodología base de Arvanitidis y Rosing (1970) fue propuesta para una escala temporal de análisis mensual y con propósitos de planeamiento energético. Esta es una diferencia importante con la metodología actual ya que en la escala mensual la incertidumbre introducida por los tiempos de viaje puede ser menor en comparación con la escala diaria. Una forma de eliminar esta incertidumbre es a través del balance individual de cada central y contabilizando en cada intervalo de tiempo los flujos que efectivamente se incorporaron y contabilizaron a cada embalse.

La incertidumbre introducida por los tiempos de viaje del agua circulando entre embalses en cadena no es constante en el tiempo y depende en cada caso principalmente de la magnitud del caudal descargado. Además, en cadenas con más de dos (2) embalses y/o centrales los tiempos de viaje entre las mismas puede ser distinto y requeriría estimaciones de balance de energía a diferentes escalas temporales, lo que no posibilita la definición de una escala de tiempo única para el cálculo del balance de energía del SIN. Estas dificultades en la definición de los tiempos de viaje requieren entonces de estudios particulares sobre el tema para cada cadena.

El agua que está en tránsito efectivamente sigue siendo energía potencial, pero presente imprecisiones para el cálculo del balance. Por lo anterior, una mejor aproximación de esta fuente de incertidumbre requiere de un análisis más detallado de la información en escalas de tiempo inferiores a la diaria, la cual es la que se utiliza actualmente en el cálculo del desbalance.

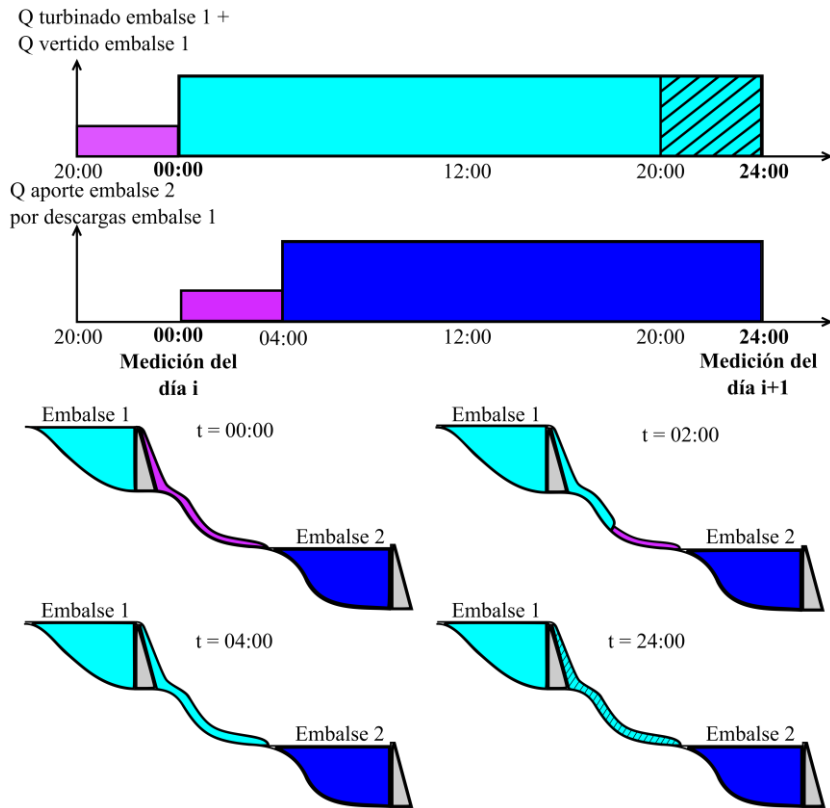


Figura 6. Esquema conceptual de tránsito del agua entre embalses en cadena.

2.2.2.6 Incorporación de restricciones físicas de las centrales y/o cadenas en el balance de energía potencial

Con el análisis de información de algunas cadenas de embalses, se encontró que existen restricciones físicas importantes que pueden mejorar la estimación del balance actual de energía potencial. A continuación, se resumen los casos identificados.

2.2.2.6.1 Cadena Pagua

En la Figura 7 se muestra la topología de la cadena Pagua. La formulación actual asimila esta cadena como si todos los embalses cuyas aguas podrían llegar eventualmente a Alicachín pudieran ser aprovechadas en el intervalo de tiempo diario en las centrales Paraíso y La Guaca.

Aunque en principio en el método de balance de energía como lo es la actual, esta concepción es válida bajo una escala de tiempo adecuada, es necesario incorporar las restricciones físicas que hacen parte de la topología para la escala de tiempo de análisis. En este caso en particular, el bombeo desde Alicachín hacia el embalse Muña representa una restricción física de la cantidad de

agua que podría convertirse en aporte real para dicho embalse, el cual es el que físicamente se encuentra conectado al sistema de generación y, por lo tanto, es donde se debería concentrar el balance de energía (incluso potencial).

El agua de los embalses Sisga, Chuza, Tominé y Neusa se encuentra almacenada y podría concebirse como un potencial para generación; sin embargo, el uso de dicha agua está limitado por la restricción física que impone el bombeo desde Alicachín hacia el embalse de Muña. La incorporación de esta restricción física implica aislar el embalse Muña y considerar el aporte desde Alicachín en la escala de tiempo diaria según las características del sistema de bombeo y el agua disponible desde los embalses aguas arriba. De esta manera, el desbalance disminuye ya que no se tendrían en cuenta los aportes y volúmenes de los embalses Sisga, Chuza, Tominé y Neusa. Para ilustrar el efecto de considerar esta restricción física, en la Figura 8 se muestra la comparación entre el desbalance de abril a diciembre del año 2017 (reportado en la información base) y el calculado sólo para el embalse Muña. En la Tabla 2 se comparan los estadísticos de ambos desbalances. Se puede observar que hay una disminución drástica en la magnitud del desbalance de este sistema tras incluir la restricción física en el cálculo del desbalance.

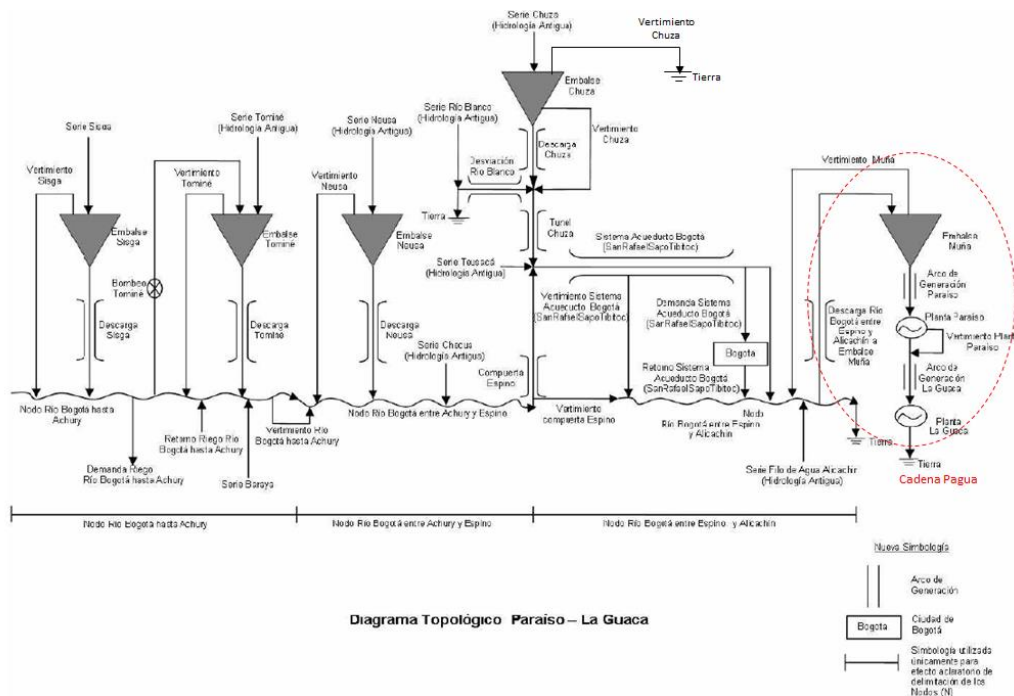


Figura 7. Cadena Pagua (ENEL/EMGESA) – Configuración esquemática del sistema. Fuente: ENEL/EMGESA.

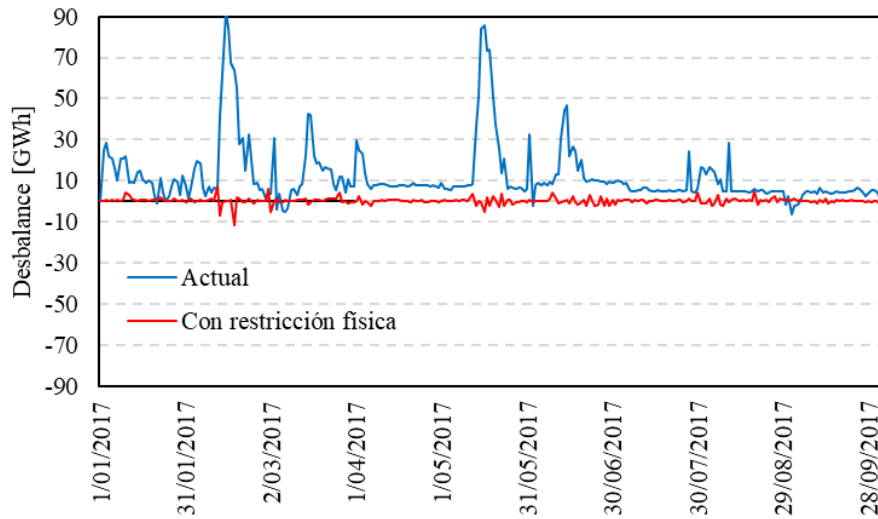


Figura 8. Desbalance diario actual y con restricciones físicas de la cadena Pagua durante el año 2017.

Tabla 2. Desbalances estimados para la cadena Pagua con la metodología actual e incluyendo restricciones físicas.

Estadístico	Desbalance [GWh]	
	Actual	Con restricción física
Suma aritmética	3403.84	67.44
Suma valores absolutos	3469.39	96.48

2.2.2.6.2 Cadena Guatrón

En la Figura 9 se muestra la topología de la cadena Guatrón. Aunque no se obtuvo el modelo matemático completo de la aplicación actual del desbalance para esta cadena, se identificaron dos (2) restricciones físicas para los aportes al embalse Troneras que no son incluidas actualmente según el entendimiento parcial alcanzado del modelo. (i) En la Bocatoma Tenche existe un vertimiento que sale del sistema y no ingresa al embalse Troneras el cual es reportado por el operador de la cadena. Dicho vertimiento no es restado actualmente del aporte potencial que ingresa al embalse Troneras, el cual incluye el trasvase desde el túnel Nechí-Pajarito-Dolores y el río Concepción. (ii) El túnel desde la Bocatoma Tenche hacia Troneras (Túnel Tenche-Troneras), cuenta con una capacidad máxima de caudal que debe ser tenido en cuenta al momento de definir el aporte hídrico al embalse. Al incorporar estas restricciones, se espera que el balance de energía potencial actual sea más representativo de la realidad del sistema y además se acoten los aportes que potencialmente pueden llegar al embalse en la escala de tiempo de análisis.

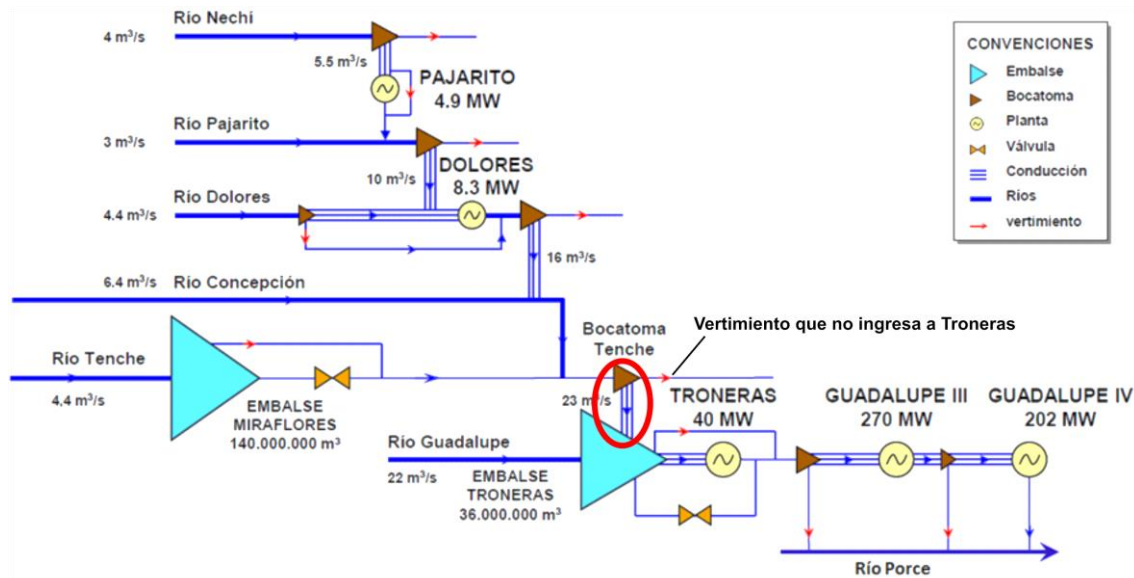


Figura 9. Cadena Guatiron (EPM) – Configuración esquemática del sistema. El contorno rojo señala la conducción desde la Bocatoma Tenche hacia el embalse Troneras. Fuente: modificado de EPM.

Para este caso no fue posible hacer el ejercicio de cómo cambia la magnitud del balance energético – desbalance, por lo ya explicado anteriormente.

2.2.2.7 Inclusión de centrales con falta de información

De la revisión de la información suministrada por XM, se identificó que el balance energético del SIN incluye algunas centrales que no cuentan con mediciones y/o reporte de la totalidad de los términos que componen la ecuación del balance de masa:

$$Vol_i = Vol_{i-1} + Aportes_{i-1} - G_{i-1} - Ver_{i-1} - DNT_{i-1} \quad (6)$$

Así, la mayoría de las centrales a filo de agua que no cuentan con el reporte de todas las variables, son incluidas de manera aproximada en el balance, introduciendo un desbalance importante en el sistema.

En particular se destaca el caso del denominado “Otros Ríos”, el cual corresponde a un aglomerado de aportes hídricos asociados a un grupo de centrales (el cual ha cambiado en el tiempo), de las que no se cuenta con el reporte de esta variable y que son estimados de manera aproximada, estimándose que para el primer semestre de 2018 introducen un desbalance positivo del 25%, según las estimaciones de XM. Esta fuente de incertidumbre puede reducirse haciendo que la totalidad de este tipo de plantas reporten la totalidad de la información requerida para realizar el correcto balance

de cada una de ellas. Mientras esto se lleva a cabo, las plantas con información incompleta deben excluirse del análisis hasta cuando empiecen a reportar toda la información.

2.2.2.8 Inclusión de plantas no despachadas centralmente

Entre la información recibida por parte de XM el pasado 20 de febrero de 2019, se encuentra un reporte de plantas que han entrado y salido del despacho central en diferentes períodos del registro. Dichas centrales, en su mayoría menores, son incluidas en el balance energético sólo a través de la variable generación ya que no cuentan con información de las demás componentes del balance y por lo tanto no se tiene control de su balance de masa:

$$Vol_t * FC = Vol_{t-1} * FC + Aportes_t * FC - G_t - Ver_t * FC - DNT_t \quad (7)$$

Por esta razón, la consideración de estas plantas en el análisis, aunque sea temporalmente, genera un sesgo adicional del balance energético - desbalance. Esta fuente de incertidumbre se puede eliminar al garantizar que las mismas realicen el reporte de la información operativa para las fechas en que cambian de despacho como lo indica la normatividad. Sólo se deben incluir estas plantas cuando cuenten con información completa para el cálculo del desbalance, mientras en los períodos anteriores con información incompleta la planta debe ser excluida del balance del SIN.

2.2.2.9 Estimación de aportes diarios

Aunque no se conoce con detalle la resolución de las mediciones de los aportes de cada central a partir de la cual se realiza la agregación para la estimación del aporte hídrico diario, es importante aclarar que este valor debe resultar de varias mediciones a lo largo del día, preferiblemente proveniente de medición continua, y no de una única medición realizada en algún momento particular del día. Esto con el fin de calcular de manera adecuada el flujo promedio diario que se reporta al CND.

Así mismo, se reconoce la dificultad de cuantificar los aportes hídricos secundarios a cada embalse. Sin embargo, dado que son aportes que efectivamente se incorporan al volumen embalsado, al no cuantificarlos se introduce un error en el balance del que se debe ser conscientes al realizar estimaciones de los balances de masa y de energía.

2.2.2.10 Análisis de datos atípicos o anómalos de las variables reportadas

La mayoría de las series de desbalance entregadas para este trabajo presentan valores atípicos o anómalos que no siguen la tendencia general del resto de la serie. En muchos casos, estos datos

anómalos del desbalance provienen de las mediciones, ya que también se observan en el cálculo del balance de masa. Se identificó que cambios en las tecnologías de medición a partir de las cuales se reportan los datos, o reportes errados de alguna(s) variable(s) del balance de masa pueden inducir cambios significativos en el valor de una variable el día $i+1$ respecto al día i , que finalmente se traducen en un incremento ficticio del desbalance.

Por lo anterior, se considera que un procedimiento previo al cálculo del balance – desbalance de energía debe ser la revisión de la coherencia y consistencia de la información base reportada por los operadores. Dicha revisión debe llevar a que se identifique a partir del balance de masa si existe alguna inconsistencia en alguna de las variables reportadas y, por lo tanto, se corrija el dato antes de realizar el análisis completo. Para las series históricas de desbalance con que se cuenta actualmente, es necesario realizar los análisis cuantitativos de la información removiendo los datos atípicos, ya que estos pueden tener un efecto importante en los estadísticos de tendencia central de la serie y distorsionar las conclusiones del análisis

2.2.3 CONCLUSIONES

La principal conclusión del análisis realizado es que el método actual del cálculo del balance de energía – desbalance amplifica el desbalance del sistema. Las principales fuentes conceptuales de error yacen en el uso implícito de factores de conversión diferentes para los componentes del balance hídrico y la no inclusión de las descargas no turbinadas en las centrales que disponen de ellas. En la Tabla 3 se compara para las centrales individuales analizadas, el desbalance actual y el estimado al incluir las descargas no turbinadas y definir la energía generada como el producto del caudal turbinado y el factor de conversión. En todas las centrales, excepto Chivor, hubo una disminución del desbalance actual al incluir las modificaciones mencionadas.

Tabla 3. Desbalance calculado con el método actual y calculado incluyendo descargas no turbinadas y con el término de energía turbinada, definido como el producto del caudal turbinado y el factor de conversión.³

Central	Desbalance [GWh]			
	Suma aritmética		Suma valores absolutos	
	XM - Actual	$Q_T \times FC_m$ y DNT	XM - Actual	$Q_T \times FC_m$ y DNT
Betania	-1644.37	-154.69	1644.37	318.45

³ Se comparan el efecto de utilizar directamente la energía medida sin verificación de uso del mismo factor de conversión en todos los componentes del desbalance hídrico y la no inclusión del efecto de las descargas no turbinadas (XM-Actual) con los resultados de usar el mismo factor de conversión a todos los términos del desbalance hídrico y la inclusión de las descargas no turbinadas ($Q_T \times FC_m$ y DNT). Las incertidumbres

Central	Desbalance [GWh]			
	Suma aritmética		Suma valores absolutos	
	XM - Actual	$Q_T \times FC_m$ y DNT	XM - Actual	$Q_T \times FC_m$ y DNT
Calima	-5.50	0.20	22.60	17.35
Chivor	381.62	-816.57	706.78	942.14
Guavio	115.16	-11.60	183.08	12.45
Miel I	-360.03	-274.17	374.74	303.36
PorcellI	-3374.67	42.30	3431.48	80.28
Prado	57.20	-0.97	182.31	127.05
Salvajina	3.92	0.04	95.36	20.66
SanCarlos	-6032.54	484.47	6034.64	699.90
Sogamoso	-459.96	-246.90	813.14	647.66
Urrá	-92.58	6.49	109.15	6.64

En el caso particular de las cadenas de embalses, una limitación importante de la metodología de balance energético potencial es la suposición de circulación inmediata (en el período de tiempo de análisis) del agua entre centrales y la no inclusión de restricciones físicas que acotan las variables del balance.

Por otro lado, se encontraron inconsistencias en la información base que se pueden reflejar posteriormente en los cálculos en valores atípicos del desbalance. Por lo tanto, se considera importante realizar un análisis de calidad de la información antes de proceder al cálculo del balance de energía – desbalance y, para la información histórica, se considera más conveniente omitir en los análisis datos atípicos que pueden ser identificados mediante algún método aceptado.

Dado que el cálculo del desbalance al incluir plantas con información parcial de las variables puede introducir un error importante, se considera que estas no deben ser tenidas en cuenta hasta que no se cuente con la información completa de todas sus variables requeridas. En los alcances C y G del presente contrato se profundiza sobre estas observaciones. Lo anterior entonces se traduce en la necesidad de medir y reportar todas las variables para todas las plantas despachadas centralmente, incluyendo aquellas que entran al despacho central temporalmente, pero son incluidas en el cálculo del balance de energía – desbalance.

asociadas a las mediciones y/o estimaciones de las variables del balance hídrico están presentes en los dos tipos de resultados comparados.

2.3 RANGOS DE INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES DEL BALANCE ENERGÉTICO – DESBALANCE A PARTIR DEL BALANCE DE MASAS

Con el fin de cuantificar los rangos de incertidumbre de las variables que intervienen en el balance energético - desbalance, se realizó un análisis estadístico de las series recibidas para el año 2017 para cada central con información completa. Se realizó el análisis de cada variable en unidades de masa teniendo en cuenta que es como se mide y reporta la información por parte de los agentes.

Para este análisis se hace una redefinición de variables, como se presenta a continuación:

Los reportes de las plantas hidroeléctricas son diarios, y por tanto, permiten realizar el balance de masa en millones de metros cúbicos [Mm^3]:

$$Vol_t = Vol_{t-1} + Aportes - Ver - Qt \quad (1)$$

El balance de masa se cumple si los volúmenes estimados son iguales a los volúmenes calculados, tal que:

$$Vol_t - Vol_{t-1} = Aportes - Ver - Qt \quad (2)$$

$$\Delta Vol = Aportes - Ver - Qt \quad (3)$$

A partir de la ecuación (3) se procede a hacer un análisis de los rangos de incertidumbre de cada una de las variables central por central.

Luego de hacer remoción de los outliers, se realiza un análisis de la regresión de la ecuación de balance de masa con el fin de parametrizar (mediante la pendiente y el intercepto de la regresión) el balance de masa de cada central. Finalmente, se presenta una estimación de la incertidumbre de cada variable que interviene en el cálculo del balance de energía-desbalance.

A partir de las variables definidas ΔVol y ΔVol_{cal} , se procede a realizar un análisis de regresión mediante la implementación de la metodología Deming. Esta metodología permite realizar una regresión lineal a los datos, considerando los valores de error aleatorio y/o incertidumbre de las variables. Este método realiza ajuste lineal simple por mínimos cuadrados y además un ajuste lineal, considerando la variación ortogonal de las magnitudes a la recta de ajuste; a partir de ambos ajustes se puede obtener la diferencia de las mismas, la cual se asocia a el error o incertidumbre de las variables.

Los modelos de regresión Deming dan una orientación del comportamiento de las variables incluidas en cada balance de masas por planta, las incertidumbres expandidas de los volúmenes calculados varían si se tiene en cuenta o no las descargas no turbinadas, siempre y cuando sean reportadas. En términos generales, los porcentajes de incertidumbre son muy bajos, sin embargo, con este método no es posible identificar la proporción de varianza residual explicada por cada variable, a no ser que se conozcan las incertidumbres asociadas a cada variable.

2.4 DESBALANCE ENERGÉTICO POR PLANTAS EN EL AÑO 2017

Se realizó un análisis descriptivo de las diferentes variables que influyen en el desbalance energético mediante análisis estadístico, para posteriormente realizar la comparación de los registros diarios en [GWh], de dos (2) alternativas para el cálculo del desbalance energético diario. El objetivo de esta comparación fue identificar si existen diferencias entre el ΔVol_{cal} en [GWh] cuando éste se calcula utilizando directamente la generación medida en contador (metodología actual) empleando para las otras variables del balance un factor de conversión, o cuando se calcula generación mediante la conversión del caudal turbinado mediante el uso de un factor de conversión (según lo propuesto por Arvanitidis y Rosing (1970)).

Con este propósito, en esta comparación se denomina “energía medida” al procedimiento mediante el cual el balance o desbalance energético se calcula aplicando el FC mediano a todas las variables hidráulicas del balance hídrico, excepto al caudal turbinado, de manera que la energía generada se toma directamente de la lectura de los contadores de la central en su frontera comercial. Por su parte, el procedimiento comparado que aquí se denomina como “energía estimada”, corresponde a la conversión del balance o desbalance hídrico utilizando el FC mediano en la totalidad de los términos del balance hídrico.

Para este ejercicio se realizó redefinición de las variables nuevamente en unidades de energía como se muestra a continuación.

$$\Delta Vol = E_t - E_{t-1} \quad (4)$$

y lo ΔVol_{cal} , como

$$\Delta Vol_{calM} = E_A - E_V - Ge_M \quad (5)$$

cuando se emplea de manera directa la generación medida, y como

$$\Delta Vol_{calE} = E_A - E_V - Ge_E \quad (6)$$

cuando se emplea la generación estimada.

Se procedió a comparar el comportamiento de los ajustes del desbalance e masas y energético, mediante el comportamiento del intercepto y la pendiente de cada una de las regresiones, donde el intercepto representa el sesgo generado en el ajuste, y la pendiente representa la relación entre ΔVol y ΔVol_{cal} . Con el fin de facilitar la interpretación de la pendiente y el intercepto obtenidos en los ajustes, se construye la Tabla 4, la cual resume el significado que se tendrá para los diferentes escenarios que pueden presentarse en el análisis realizado.

Tabla 4. Comparación intercepto y pendiente

Intercepto	Pendiente	Significado
Igual a cero	Igual a uno	No hay sesgo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa una relación uno a uno entre ΔVol y ΔVol_{cal} . En este caso se considera que el ajuste entre ΔVol y ΔVol_{cal} presenta un balance perfecto, el cual es representado por una línea negra punteada de 45°.
Igual a cero	Mayor a uno	No hay sesgo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos mayores a la unidad en ΔVol .
Igual a cero	Entre cero y uno	No hay sesgo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos menores a la unidad en ΔVol .
Mayor a cero	Igual a uno	Hay un sesgo positivo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa una relación uno a uno entre ΔVol y ΔVol_{cal} .
Mayor a cero	Mayor a uno	Hay un sesgo positivo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos mayores a la unidad en ΔVol .
Mayor a cero	Entre cero y uno	Hay un sesgo positivo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos menores a la unidad en ΔVol .
Menor a cero	Igual a uno	Hay un sesgo negativo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa una relación uno a uno entre ΔVol y ΔVol_{cal} .
Menor a cero	Mayor a uno	Hay un sesgo negativo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos mayores a la unidad en ΔVol .
Menor a cero	Entre cero y uno	Hay un sesgo negativo entre ΔVol y ΔVol_{cal} , y en general se observa que incrementos en una unidad en ΔVol_{cal} generan incrementos menores a la unidad en ΔVol .

3. ALCANCES C, D Y E

En este capítulo se presentan todos los ajustes propuestos para la estimación de los desbalances energéticos, el análisis y la aplicación de la metodología no se presenta, dado que el análisis se realiza por central y es bastante extenso. Este puede consultarse en el informe final del proyecto,

3.1 DEFINICIONES

Como parte del este alcance se proponen definiciones para cada uno de los siguientes términos:

- Balance de masas
- Balance hídrico
- Contenido energético del agua
- Balance de energía para centrales de tecnología hidráulica
- Factor de conversión hidráulico – Propuesta de ajuste al Protocolo emitido a través del Acuerdo CNO 694 de 2014
- Factor de Conversión Hidráulico Mediano (FCm) - Propuesta de ajuste al Protocolo emitido a través del Acuerdo CNO 694 de 2014
- Factor de Conversión Operacional u Operativo (FCo)
- Variables operativas hidrológicas
- Plantas despachadas centralmente
- Plantas no despachadas centralmente
- Desbalance de energía o masas
- Embalse con central
- Embalse de suministro para una Central X

3.2 VARIABLES REQUERIDAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y BALANCE DE ENERGÍA DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN CON TECNOLOGÍA HIDRÁULICA

De los resultados obtenidos en el Alcance a de este proyecto, se procede a listar las variables requeridas para las centrales de generación con tecnología hidráulica que deben ser incluidas en el balance de masa y posterior balance de energía.

Actualmente la declaración de estas variables al CND por parte de los agentes, se realiza en cumplimiento del Código de Operación establecido por la CREG⁴, en la cual se especifican algunas de las variables que se describen a continuación, por lo que será necesario el ajuste de esta con la inclusión de las variables que se consideran necesarias para la disminución del error en el balance de masas.

Dado el interés del sector por conocer la energía almacenada en el sistema, es necesario que esta información esté disponible para los Embalses de suministro y los Embalses con central.

Para disminuir el error y la incertidumbre asociada con la conservación de masa de un sistema, es necesario considerar todas las entradas y salidas de agua del sistema, además de tener un control en la medida del cambio en el almacenamiento en el mismo. Por lo tanto, se recomienda que, para cada uno de los embalses, ya sea con central y/o de suministro, realizar estudios específicos y diagnosticar la importancia del volumen de agua representado en precipitación y/o evaporación sobre el embalse, además de infiltraciones y/o ex filtraciones.

Así de forma general la ecuación de balance de masa y/o hídrico se representa como:

$$Vol_est_i = Vol_med_{i-1} + Aportes_i + Prec_e_i + Fil_e_i - Q_{T_i} - Ver_i - DNT_i - EVP_e_i - Exf_e_i \quad (7)$$

$$Desbalance\ de\ masas = Vol_est_i - Vol_med_i \quad (8)$$

Donde

Vol_est_i corresponde al volumen de embalse estimado para el periodo de tiempo i en Mm^3 .

Vol_med_{i-1} corresponde al volumen medido y/o reportado de embalse para el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

$Aportes_{i-1}$ corresponde a los caudales de aporte totales medidos y/o reportado de embalse para el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

⁴ Resolución CREG 025 de 1995 y las que la modifican y/o adicionan.

$Prec_{e_{i-1}}$ corresponde al volumen de agua precipitada en el embalse medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

$Fil_{e_{i-1}}$ corresponde al volumen de agua filtrada hacia el embalse medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

Qt_{i-1} corresponde al volumen total de agua turbinada medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

Ver_{i-1} corresponde al volumen total de agua vertida medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

DNT_{i-1} corresponde al volumen total de agua descargada del embalse que no ha sido turbinada, y distinta a la reportada como vertimiento, medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

$EVP_{e_{i-1}}$ corresponde al volumen de agua evaporada en el embalse medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

$Exf_{e_{i-1}}$ corresponde al volumen de agua filtrada que sale del embalse medida y/o reportada el periodo de tiempo $i-1$ en Mm^3 .

Los subíndices *est* y *med* corresponden a valores estimados o calculados y medidos respectivamente, e *i* corresponde al intervalo de tiempo determinado de la estimación. A continuación, se describen cada uno de los términos presentados en la ecuación (7).

A pesar que la responsabilidad del reporte de las variables operativas hidrológicas es de los agentes, se considera necesario que la plataforma y/o sistema que recibe tal información sea adaptada con indicadores o protocolos de verificación de la consistencia de la información reportada.

El control de la calidad y consistencia de la información debe hacerse considerando, entre otros, los siguientes criterios:

- Alertas o revisiones de valores de cero "0" de las siguientes variables: Apor, Qt y Vol.
- Estimación del balance de masas diario.

- Alertas o revisiones de valores mayores a un valor de control o de alerta en el cambio de volumen de un embalse entre días consecutivos⁵: $\Delta Vol_{med} = Vol_{med_{i-1}} - Vol_{med_i}$.
- Control de las variables reportadas respecto de los parámetros de diseño, caudal de diseño, volumen máximo, cotas máxima y mínima, etc.

Cada una de las alertas que se genere por condiciones como las descritas requerirá que el agente revise la información reportada y proceda a dar claridad de los datos o cambio y ajuste de los mismos.

Se resalta además que el uso de datos de series históricas para cualquier tipo de análisis requiere de una evaluación de su consistencia, verificando la posible presencia de valores anómalos y valores atípicos o outliers, dado que esto garantiza la calidad de la información base y la mejor aproximación de los estimadores que se pretendan obtener.

3.3 BALANCE DE ENERGÍA – DESBALANCE

Como parte del alcance c, la Universidad hace una propuesta de mejora de la metodología actual implementada para los desbalances energéticos con el fin de reducir la incertidumbre en la estimación. A continuación, se describen los puntos de la propuesta.

3.3.1 OBJETIVO DEL DESBALANCE

El cálculo de la diferencia entre el resultado del cálculo teórico o el valor calculado o estimado del estado del embalse al final del período i y el valor medido del mismo también al final del mismo período, es conocido como desbalance. Este permite verificar la confiabilidad en las mediciones de las variables que hacen parte de la ecuación del balance, siendo una medida de un error que, dependiendo de su magnitud referida a su valor esperado teórico (que es cero), permite detectar la existencia de problemas en la confiabilidad de una o más de las variables medidas o errores sistemáticos en la medición de las variables que hacen parte de la ecuación del balance.

⁵ La magnitud del valor de control corresponde a un umbral de verificación a la variación en el volumen embalsado, el cual, para variaciones positivas (embalsamiento), la alerta se debe definir en cada central ya sea con base en un múltiplo del valor medio multianual de los aportes hidrológicos y/o una creciente de bajo período de retorno (por ejemplo, entre 1,5 a 2 años de recurrencia); así mismo, en el caso de variaciones negativas, el valor de alerta se debe definir considerando el arco de generación de central, el caudal turbinado y el vertimiento en el período i .

Ante una alerta de este tipo se debe revisar la consistencia de la variación del embalse con los aportes al mismo, los vertimientos y caudales turbinados, entre otros

En este sentido la realización del cálculo de los desbalances debe realizarse en cada central y para cada período para las masas o volúmenes y no para los estimados de sus contenidos energéticos. Esto debido a que los contenidos energéticos involucran el empleo de factores de conversión que tienen su propia fuente de incertidumbre, de manera que al ser empleados para convertir los volúmenes en su contenido de energía equivalente introduce fuentes de error adicionales a los subyacentes en las variables originales (los volúmenes).

Bajo este contexto, para los propósitos de este informe el concepto de desbalance ya sea de masas (volúmenes) o energético, se considera como una medida de la confiabilidad en las mediciones de las variables que integran la ecuación del balance.

3.3.2 UNIDAD DE ANÁLISIS Y PLANTAS

Para el balance de energía – desbalance se considera que la Unidad de Análisis corresponde a una planta de generación hidráulica.

3.3.3 VARIABLES REQUERIDA

Además de las variables descritas en el numeral 3.2, se requiere para cada una de las plantas el factor de conversión hidráulico que permite la transformación de las variables hidrológicas de unidades de masa a unidades de energía equivalente.

3.3.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DEL AGUA - FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO

Para la conversión de las variables en masa descritas en el numeral 3.2 se viene utilizando el Factor de Conversión Hidráulico Mediano (FC_m) de cada central.

Respecto al factor de conversión hidráulico, la Universidad realizó recomendaciones de ajuste del cálculo actual del mismo, resultados presentados en el informe del Alcance *f* del proyecto. Además del cumplimiento del objetivo del Alcance *f* se realizaron ejercicios de análisis del comportamiento del Factor de Conversión Operacional u Operativo (FC_o) que se considera representa de mejor forma las condiciones de operación normales de las centrales hidroeléctricas y que además integral todos los criterios técnicos y operativos que deben tenerse encuentra en la valoración energética del agua.

Teniendo en cuenta esto, el planteamiento de la Universidad es que el factor de conversión hidráulico actual contenido en el acuerdo del CNO 694 de 2014, inclusive el valor mediano, debe evolucionar

en el largo plazo hacia la exploración del Factor de Conversión Operacional u Operativo como una alternativa de cálculo al actual Factor de Conversión (FC) definido en el Protocolo. Para esto, es necesario que los agentes procedan a la instrumentación y medición con el menor error posible de los caudales turbinados (las recomendaciones respecto a este tema se presentan en el informe del alcance g del proyecto) y paralelamente la serie de datos diarios de generación de contador que se reconoce es de mayor precisión.

La visión de evolución del FC se plantea en la Figura 10.

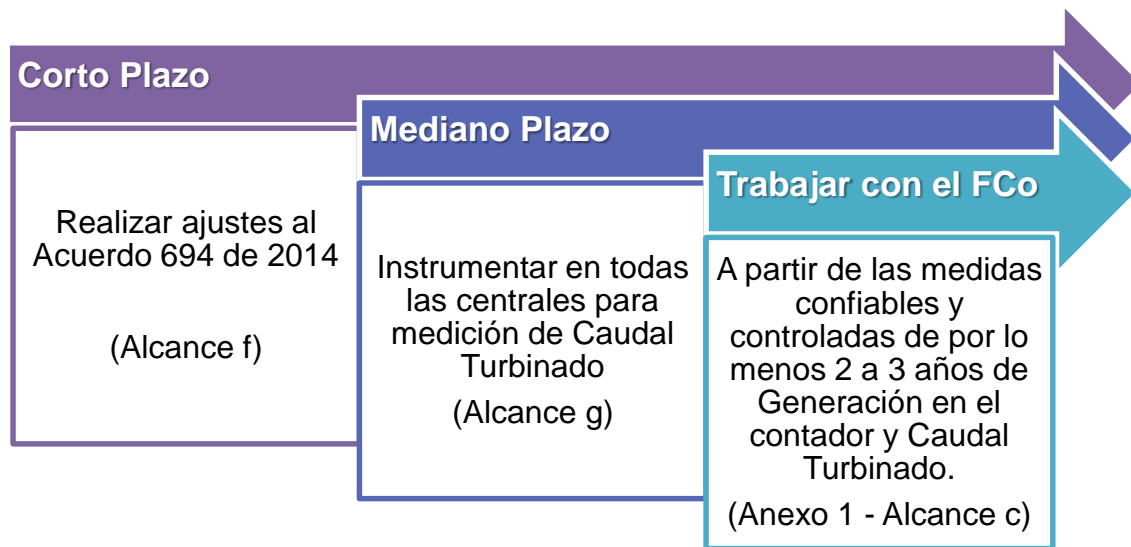


Figura 10. Propuesta de análisis del Factor de Conversión hidráulico.

3.3.5 BALANCE DE ENERGÍA

El procedimiento propuesto por la Universidad para la transformación del balance hídrico en balance energético corresponde al mismo planteado en su formulación original (Arvanitidis y Rosing (1970)), y que consiste en realizar la conversión de los diferentes componentes del balance hídrico en energía mediante la utilización del mismo factor de conversión en energía, garantizando igualmente que el balance energético resultante esté sujeto a las restricciones físicas inherentes a cada variable y al efecto de los tiempos de viaje entre plantas cuando se consideran tránsito de flujos entre centrales de una cadena.

El balance de energía se propone como se presenta en las ecuaciones (9) y (10), las cuales se basan en la valoración energética del balance de masas o hídrico por medio del uso del factor de conversión hidráulico mediano (numeral 3.3.4).

$$Vol_{est_i} * FC_m = Vol_{i-1} * FC_m + Aportes_i * FC_m + Prec_{e_i} * FC_m + Fil_{-e_i} * FC_m - Q_{t_i} * FC_m - Ver_i * FC_m - DNT_i * FC_m - EVP_{e_i} * C_m - Exf_{e_i} * FC_m \quad (9)$$

$$Desbalance\ de\ energía = Vol_{est_i} * FC_m - Vol_{med_i} * FC_m \quad (10)$$

Donde FC_m corresponde al factor de conversión hidráulico mediano.

Las ecuaciones (9) y (10) se deben aplicar a la Unidad de Análisis (numeral 3.3.2).

Para la obtención del desbalance de energía del SIN, será necesario entonces la agregación de los balances de energía de cada una de las plantas del sistema.

$$Desbalance\ de\ energía\ del\ SIN = \sum_{j=1}^n (Vol_{est_i} * FC_m - Vol_{med_i} * FC_m) \quad (11)$$

Donde j representa cada una de las plantas de tecnología hidráulica del SIN.

3.3.6 ESCALA TEMPORAL DE ESTIMACIÓN

La escala de estimación del balance de energía debe asociarse al uso que se le da al indicador, sin proceder a realizar un promedio de su magnitud, si no incluyendo y/o analizando la variabilidad temporal del mismo.

3.3.7 INDICADORES DE SEGUIMIENTO DEL BALANCE DE ENERGÍA

Este numeral corresponde al cumplimiento del Alcance e del contrato. Cuando se realiza el balance energético-desbalance para cada una de las centrales es muy importante verificar que estos desbalances no se desborden presentando valores atípicos. Para esto se recomienda la definición de indicadores que den señales de alerta e indique cuando la magnitud del desbalance es desproporcionada para verificar así los datos reportados y asegurarse que esta magnitud anómala no sea producto de un error en el reporte de los datos.

Para esto se proponen tres (3) indicadores que permiten evaluar el desempeño del desbalance en cada una de las centrales del SIN. Se proponen índices adimensionales para la comparación del desempeño del balance energético en las diferentes plantas del SIN así estas tengan diferentes capacidades de generación. Estos tienen como base el balance masas o el desbalance energético, por lo que la validez y representatividad de estos indicadores está sujeta a que todas las componentes del balance hídrico se midan de forma directa y que ninguna se estime haciendo uso del balance operativo.

Los tres (3) indicadores propuestos son relación del desbalance masa y caudal turbinado (DT), relación del desbalance energético respecto a la capacidad instalada (DC) y la relación del desbalance energético respecto a la generación (DG).

3.4 ENERGÍA ALMACENADA EN EL SIN

Debido a que en de algunas actividades del planeamiento operativo se requiere la contabilización de los recursos energéticos disponibles para el SIN en un período determinado, es importante resaltar que esta información es diferente a los balances y/o desbalances. Para esto se propone adicionar a los resultados de los Balances Energéticos, más los valores de energía resultante en cada uno de los “Embalses de Suministro” o Distribución asociados a las diferentes Centrales tipo X localizadas aguas abajo.

La adición de los contenidos energéticos de los “Embalses de Distribución” antes mencionada, es equivalente a la forma cómo se agregan actualmente los contenidos energéticos de los embalses en las cadenas, con excepción en la forma cómo debería definirse el factor de conversión a ser utilizado en cada caso (FC asociado al nivel del embalse de la Central X en el período considerado).

Teniendo en cuenta la importancia del conocimiento por parte de los agentes y operadores de la energía almacenada en los embalses del SIN, que es el equivalente a la energía potencial, aunque no es parte del alcance de los trabajos, se incluye en este informe una propuesta de cómo la Universidad considera se debe estimar la cantidad de energía almacenada en el SIN. Según el numeral 4.2.4, la incertidumbre que existe en el agua en circulación entre los embalses de la cadena es alta y requiere para su correcta valoración estudios específicos por cadena y en diferentes escenarios hidrológicos para su entendimiento. Dado lo anterior, se considera que la energía almacenada en el SIN debe evaluarse a partir del agua almacenada en los embalses, ya sean embalses con central o de suministro.

Siendo así, la energía almacenada en el SIN se puede estimar cómo se presenta en la ecuación (12).

$$\text{Energía almacenada en el SIN} = \sum_{j=1}^n \left(Vol_i * \sum_{k=1}^m FC_m \right)_j \quad (12)$$

Donde j corresponde a cada planta y/o cadena del SIN y k corresponde a las centrales de una cadena que pueden dar aprovechar el contenido energético del agua almacenada en el embalse.

Teniendo en cuenta que hay Embalses con central y de Suministro, a continuación, se presenta la propuesta de estimación del factor de conversión aplicable para cada uno de ellos.

Se definen además los factores de conversión hidráulico a ser usados según el tipo de embalse definido.

4. ALCANCE G

Para el cumplimiento de este alcance se realizó un diagnóstico de la situación actual del monitoreo hídrico en las centrales del SIN, el cual se apoya en la información diligenciada por los operadores a través de encuestas y en la información base recibida para el proyecto; posteriormente se proponen ajustes generales que aplican para todos los sistemas de monitoreo actual de las centrales, que incluyen generalidades acerca de redes de monitoreo hídrico, su instrumentación y estándares para las mediciones, así como recomendaciones para el procesamiento, reporte, verificación y almacenamiento de la información; finalmente se proponen ajustes específicos por central definidos de acuerdo a las fortalezas y debilidades identificadas desde la información diligenciada en las encuestas.

De la información recolectada, se logró evidenciar las potencialidades y debilidades de cada uno de los agentes en la medición de las variables que se deben declarar según la resolución de la CREG 025 de 1995.

En la Tabla 5 se resume la forma de medición de cada una de las variables requeridas y usadas para la estimación del balance de masa y posterior balance energético – desbalance. En cuanto a la medición de los volúmenes almacenados se identificó que esta variable se obtiene a partir de la curva cota-volumen y mediciones de nivel del embalse. En la mayoría de las centrales la tecnología de medición de la batimetría es por ecosonda multihaz para el área inundada y LiDAR para la zona no sumergida, aunque algunas difieren y utilizan métodos menos precisos.

Además, sobre las descargas no turbinadas, se tiene que la medición se realiza a través de curvas y/o tablas calibradas que indican el caudal en función del nivel del embalse y la apertura de la compuerta.

Tabla 5. Métodos de medición o estimación de los términos ingresados al Balance Hídrico en las centrales de interés del proyecto. Fuente: Cuestionarios enviados por los agentes.

Operador	Central	Aportes	Vertimiento	Turbinado	Otras descargas
EMGESA	Guavio	Balance operativo (Estaciones en calibración)	Compuertas	FC (Protocolo). Instalado caudalímetro de ultrasonido actualmente en pruebas	SI

Operador	Central	Aportes	Vertimiento	Turbinado	Otras descargas
	Betania	Medición y regresión	Borde Libre y Compuertas	Curvas de equipos de generación de fabricante (Curvas Colinares)	NA
	Quimbo	Medición y regresión	Compuertas	Desde hace dos meses se miden mediante caudalímetro de ultrasonido.	SI
	Pagua	Balance operativo	Compuertas	FC (Protocolo)	SI
AES	Chivor	Balance operativo - Medición	Compuertas	Curvas de equipos de generación de fabricante	SI
ISAGEN	La Miel*	Medición y traslado	Borde Libre	FC (Caudalímetro en pruebas)	SI
	Jaguas	Medición y traslado	Borde Libre	FC (Caudalímetro en pruebas)	NA
	San Carlos	Medición y traslado	Borde Libre	FC (Caudalímetro en pruebas)	NA
	Amoya**	Q turbinado + Q Ecológico ó Q turbinado + Q El puerto	NA	FC (Caudalímetro en pruebas)	SI
	Sogamoso	Medición y traslado	Compuertas	Caudalímetro	SI
EPM	Guatapé	Balance operativo - Medición	Borde Libre	Caudalímetro	NA
	Troneras	Balance operativo - Medición	Borde Libre	FC (Próximo mes Caudalímetro)	SI
	Miraflores	Balance operativo - Medición	NA	NA	SI
	La Tasajera	Balance operativo - Medición	Borde Libre	Caudalímetro	SI
	Playas	Balance operativo - Medición	Borde Libre	FC (Próximo mes Caudalímetro)	NA
	Porce II	Balance operativo - Medición	Compuertas	FC (Próximo mes Caudalímetro)	SI
	Porce III***	Balance operativo	Compuertas	Caudalímetro	SI
EPSA	Alto Anchicayá	Balance operativo	Borde Libre y Compuertas	FC (Protocolo CNO)	NA
	Bajo Anchicayá	Balance operativo	Compuertas	Caudalímetro	SI
	Salvajina	Balance operativo	Compuertas	FC (Protocolo CNO)	SI
	Prado	Balance operativo	Compuertas y túnel de conducción	Caudalímetro	SI

Operador	Central	Aportes	Vertimiento	Turbinado	Otras descargas
	Calima	Balance operativo	Morning Glory	FC (Protocolo CNO)	NA
	Cucuana	Balance operativo	Azud	Caudalímetro	NA
URRA	URRA	Balance operativo	Compuertas	Caudalímetro	SI
CHEC	La Esmeralda	Medición	NA	FC (Protocolo CNO)	NA
	San Francisco	Medición	NA	FC (Protocolo CNO)	NA
	Carlos Lleras	Medición	Borde libre	Caudalímetro	SI
ALEIF	San Miguel	Medición	NA	FC (Protocolo CNO)	NA

* La Miel utiliza su descarga de fondo cuando no puede generar el caudal ecológico a través del caudal turbinado. ** La estación El Puerto mide el caudal ecológico más los caudales que pasan por encima del azud. *** El operador indica dificultad técnica en la medición hidrométrica de los aportes porque las centrales Guadalupe IV y Porce II descargan sus aguas muy cerca al embalse Porce III.

Se debe tener en consideración que la información reportada por los agentes corresponde a las condiciones actuales de medición y monitoreo, esta información no representa el cómo se han medido los datos históricamente.

A partir de la información obtenida, los formatos de reporte de la información de cada uno de los agentes al CND entregada para el proyecto y las fuentes de incertidumbre reportadas en el informe del alcance a, se procede a realizar las recomendaciones que se consideran necesarias para mejorar la calidad de la información hidrológica y meteorológica que se requiere de los proyectos hidroeléctricos del país.

A partir del conocimiento actual de los métodos de medida la Universidad procedió a realizar recomendaciones generales de los monitoreos hidrológicos, meteorológico y batimétricos. Se resalta que La Universidad considera que la información reportada por los agentes debe ser medida y se documenta en por qué el uso del balance operativo no es adecuado para la estimación de las variables del balance de masas.

Además, se hacen recomendaciones generales y particulares por central relacionadas con:

- Toma de datos - telemetría
- Precisión de los equipos y errores de medición
- Control y revisión de las curvas de calibración

- Procesamiento y revisión de los datos
- Protocolos de medición
- Reporte de datos al CND

5. ALCANCE H

5.1 USO ACTUAL DEL DESBALANCE ENERGÉTICO POTENCIAL EN LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO ENERGÉTICO DEL SIN

En la Figura 11 se presenta una esquematización de la forma cómo se viene realizando la inclusión de los desbalances energéticos potenciales diarios resultantes en el SIN en los modelos de planeamiento energético de mediano y largo plazo, como es el caso del modelo SDDP.

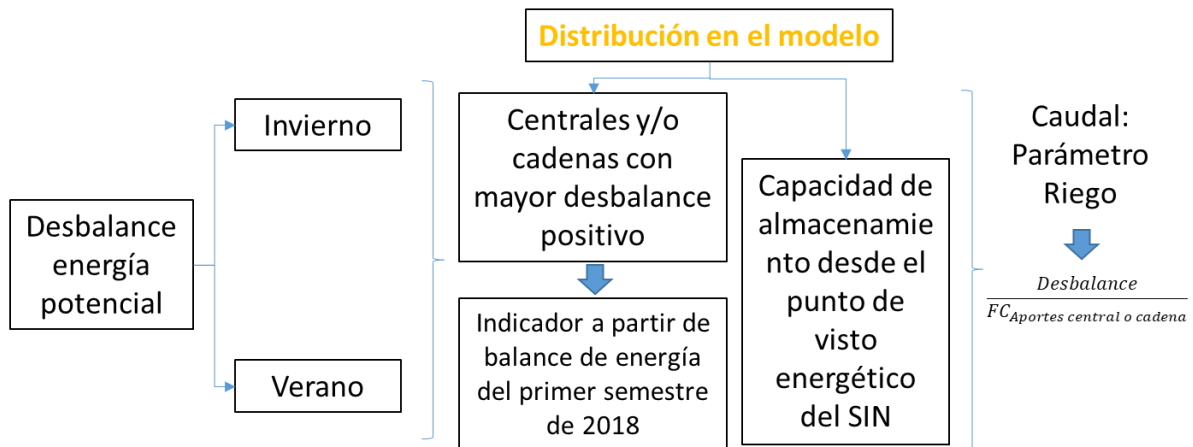


Figura 11. Modelo conceptual de la inclusión actual de los desbalances en los modelos de planeamiento energético SDDP del SIN

En términos generales, el desbalance de energía potencial diaria en el SIN calculado con la metodología actual (documentado en el informe del Alcance a), se desagrega para los subperíodos de verano e invierno. De acuerdo con lo presentado en el Anexo 1 de este informe, “*Inclusión de los desbalances en el modelo de planeamiento energético SDDP*”, se considera un único valor promedio de desbalance energético potencial diario de invierno y verano, el cual para las condiciones actuales, es de magnitud positiva, con el fin de incorporarlo en el modelo de planeamiento empleado se distribuye entre las centrales y/o las cadenas del SIN a partir de dos (2) criterios: (1) *Participación de las cadenas y centrales en el desbalance energético potencial total diario del SIN*, y (2) *capacidad de almacenamiento desde el punto de visto energético* (XM, 2019).

Una vez distribuido el desbalance energético potencial diario (en GWh) entre las centrales y/o cadenas, dicha magnitud se reconvierte en un caudal medio diario equivalente mediante la utilización del factor de conversión hidráulicos mediano, ya sea de la central aislada (FCm) o de la cadena (sumatoria de los FCm de las centrales de la cadena).

Una vez se obtienen mediante dicho procedimiento los caudales a los cuales actualmente se les atribuye el desbalance energético en el SIN, se ingresan al modelo de simulación SDDP como la variable “riego”, utilizada en dicho modelo.

5.2 CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DEL DESBALANCE ENERGÉTICO POTENCIAL DIARIO EN LOS MODELOS DE PLANEAMIENTO

5.2.1 LAS CARACTERÍSTICAS DEL DESBALANCE

Debido a que el concepto relacionado con el desbalance, ya sea hídrico o energético (informe Alcance c, d y e), corresponde a la estimación de la diferencia en la cuantificación del volumen (energía) de un embalse al final de un período *i* a partir de las variables que intervienen en la ecuación del balance hídrico (energético), comparado con el volumen (energía) medida, el mismo corresponde al concepto de “error de medición”, que en este caso se puede definir como la diferencia entre el valor calculado y el valor medido o “verdadero”.

Debido a que los términos involucrados en los desbalances provienen de sumas y restas de variables intrínsecamente aleatorias, la diferencia, como variable igualmente aleatoria, se distribuye asintóticamente como una distribución Normal, con valor esperado cero y una varianza determinada (Yevjevich, V., 1978); de esta forma, la desviación de estas características estadísticas (sesgo positivo o negativo) se origina en la precisión y/o el error de la medición en las variables que integran la ecuación del balance-desbalance, algunas de las cuales pueden manifestar variaciones no aleatorias que pueden ser de tipo sistemático.

En estas condiciones el desbalance no es un concepto físico sino un estimador de una desviación o error, lo que lo cataloga como estimador estadístico.

Por razones como esta, la utilización de los desbalances es ajena a los modelos de simulación empleados en las actividades de planeamiento, ya que en los mismos no se realizan cálculos de desbalances, sino que se aplica directamente el balance hídrico como una de las restricciones operativas básicas de este tipo de modelos.

5.2.2 ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DEL DESBALANCE ENERGÉTICO DEL SIN

Como se observa en el procedimiento actualmente utilizado (capítulo 3), el mismo corresponde a un procedimiento de tipo “circular”, en el que primero se calculan los desbalances hídricos (masa), los cuales son luego transformados en energía equivalente mediante el empleo de factores de conversión, para posteriormente calcular el desbalance energético total del sistema y, a continuación, se realiza el proceso inverso que inicia en la repartición del desbalance energético total entre centrales y cadenas que no tiene en cuenta cuál es el aporte de cada central y cadena al desbalance, y, finalmente, retornar los valores distribuidos del desbalance energético en masa, o sea nuevamente de vuelta al desbalance hídrico.

Todo lo anterior podría haber sido abordado de manera más simple y directa desde el balance hídrico de cada central, y aislar así la magnitud específica del desbalance en masa atribuible a cada una de ellas, magnitud que puede ser positiva o negativa, dependiendo de las características de las mediciones de las diferentes variables del balance hídrico en cada central. Por ello no se considera necesario ni conveniente utilizar el procedimiento actualmente empleado para “corregir” el resultado del desbalance energético potencial diario del SIN.

Debe tenerse en cuenta que en los modelos de simulación de la operación de sistemas físicos, como el modelo de planeamiento SDDP, se encuentra incorporado el balance hídrico, no el energético, el cual corresponde a una de las restricciones operativas básicas implementadas en el modelo, y se utiliza con el fin de distribuir, a partir de un proceso de optimización previo, los aportes disponibles en un embalse entre los componentes de salida del proceso modelado, como lo son la turbinación (generación), las descargas no turbinadas, los embalsamientos o desembalsamientos y los vertimientos. Por ello las reparticiones mencionadas provienen de decisiones determinísticas y de la aplicación de restricciones (balance hídrico, caudales para usos prioritarios, capacidades máximas y mínimas de embalses y de turbinaciones y/o descargas, etc.) dentro del algoritmo implementado en el código del modelo de simulación utilizado.

En la realidad operativa, las variables del balance hídrico están afectadas por factores aleatorios o no determinísticos originadas, en todas, en las incertidumbres y/o errores asociadas con sus mediciones, aunque obedeciendo a la señal primaria de tipo determinístico, determinada por el despacho; naturalmente también están otras causas de aleatoriedad (diferentes y adicionales a la medición) inherentes en las variables naturales (aportes hidrológicos, evaporación, precipitación, etc.), siendo por lo tanto variables de naturaleza diferente.

Por ello no tiene sentido el procedimiento actualmente empleado para “corregir” en el modelo de planeamiento la existencia del desbalance energético potencial diario del SIN, ya que la causa de los desbalances energéticos no está relacionada con la forma como se distribuyen los recursos disponibles en una central, sino con la incertidumbre que resulta de la medición de todas las variables que integran el balance hídrico real, no siendo apropiado incorporar a un modelo de planeamiento variables que no hacen parte del balance de la central y cuyo origen no es físico sino diferente, como se plantea en el numeral 5.2.1.

Por razones como las anteriores, la Universidad no considera apropiado ni necesario incorporar en los modelos de planeamiento actualmente utilizados en el SIN variables que no obedezcan a una justificación de tipo físico, por lo que incluir variables calculadas a partir de los desbalances energéticos potenciales desnaturaliza el empleo de modelos de simulación que se suponen representan comportamientos físicos. Las fuentes de error y/o incertidumbre usualmente no se manejan dentro de las variables que hacen parte de modelos de este tipo, sino a través de la formulación, entre otros, de escenarios y/o sensibilidades.

Como se menciona antes, si por alguna razón se llegara a requerir el uso de los desbalances, que insistimos no sería apropiado, se deberá recurrir directamente a los desbalances hídricos propios de cada central, evitando el uso de resultados de desbalances energéticos agregados que de una parte no identifican de manera explícita la fuente de los mismos (planta y magnitud), y de otra, el desbalance se distribuye a partir de la reutilización (inversa) de factores de conversión y criterios para su asignación exógenos a su origen. Debe tenerse en cuenta que los resultados de los desbalances hídricos realizados podrán ser positivos o negativos, característica que deberá preservarse el uso que se dé a este tipo de resultados.

5.3 CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados y ante la no disponibilidad completa de la información de la totalidad de las plantas del SIN, no es viable desarrollar rangos de incertidumbres que caractericen confiablemente los efectos de los resultados de los desbalances energéticos que se viene evaluando el SIN para ser representados en los modelos de simulación empleados para el planeamiento energético.

Los desbalances diarios corresponden a la cuantificación de las incertidumbres y/o los errores en la medida de las variables que hacen parte del balance hídrico, por lo tanto estos no deben ser usados

como variables complementarias dentro de la realización de modelaciones de la operación de sistemas como el SIN, debido a aspectos como los siguientes:

- El desbalance, como variable, no hace parte del balance, sino que es el resultado de comparar una de las variables del mismo (Vol_i) con el valor calculado o inferido utilizando las otras variables del balance ($Vol_{calculado}$), es decir, es una comparación de la variable medida o “real” con la estimación de la misma usando otro tipo de información, que corresponde al denominado error en la medida o en el cálculo; en este sentido el desbalance es un estimador estadístico y no una variable física.
- La incertidumbre y/o los errores en las mediciones diarias de las diferentes variables que integran la ecuación del balance son diferentes a las incertidumbres y/o errores de las mismas variables cuando se agregan temporalmente (valores semanales, mensuales, anuales); de hecho, los errores de sumas (promedios) de valores diarios tienden a compensarse en la medida en la que el período de agregación sea mayor, excepto si existen errores de tipo sistemático (sesgo).

En este sentido es bien conocido que el nivel de confiabilidad de los valores de los caudales de un río aumenta en la medida en que el nivel de agregación es mayor, siendo el menos confiable el valor diario.

Por lo tanto, no es apropiado utilizar una medida del error diario (el desbalance diario) para ser utilizado en periodos de agregación temporal superiores, como se realiza actualmente, especialmente cuando el valor original (desbalance hídrico diario) es afectado por componentes de incertidumbre adicional, como es su conversión en energía, ya sea por planta o potencial.

- Cuando se contrasta el concepto del desbalance y el uso de modelos para el planeamiento operacional, es importante tener presente que los desbalances son las salidas o resultados de las variables que intervienen en su cuantificación (variables de entrada), las que son los caudales de los ríos, los caudales turbinados, los vertimientos y las variaciones de los volúmenes del embalse, entre otros. No obstante, en los modelos para la simulación de la operación de un sistema como el SIN, las variables de entrada son, entre otros, las condiciones iniciales de los embalses y las series de los caudales de los ríos, de manera que los caudales turbinados, los vertidos, la variación de los estados de los embalses y demás variables de la simulación, son salidas de la modelación (no entradas), las cuales resultan, entre otros, de restricciones físicas como el principio de conservación de la masa (balance hídrico), los valores máximos y mínimos de los volúmenes, de los arcos de generación, de las entregas de caudales no turbinados y demás restricciones al uso del recurso hídrico aportado por los aportes hidrológicos propios de la central y de las otras con las que se interactúa.

Debido a lo anterior, la naturaleza del desbalance proveniente de la operación y de la modelación de la simulación de la operación de centrales y sistemas de centrales hace que se trate de procesos diferentes, por lo que no deberían mezclarse de forma indiscriminada.

Debido a las consideraciones anteriores y a las demás contenidas en este informe, se observa que de los términos que integran la ecuación del balance hídrico que viene siendo utilizada en el SIN para el cálculo de los desbalances, la única que interviene en la modelación de la simulación de la

operación de la operación del SIN (modelos de despacho hidrotérmico) corresponde a los aportes hidrológicos, no requiriéndose de las otras variables del balance hídrico para este propósito.

Por esta razón las incertidumbres más relevantes para propósitos de la modelación del SIN corresponden a las de los caudales hidrológicos y a los factores de conversión requeridos para transformar en energía los términos del balance hídrico incorporado en el modelo de simulación.

Teniendo en cuenta que las series de tiempo de los caudales semanales son más confiables que los diarios, aunque menos que los mensuales, y que la incertidumbre de tales series de tiempo está involucrada en sus varianzas, especialmente estacionales (por ser proceso no estacionarios), la incertidumbre de esta variable está incorporada en la información de la mismas, la cual hace parte de los datos de entrada al modelo de simulación; debido a ello, la manifestación de dicha incertidumbre en las proyecciones futuras de mediano y largo plazo depende principalmente del tipo de modelo hidrológico utilizado para la generación de las series sintéticas que emplea el modelo de simulación de la operación.

Por ello el manejo de la incertidumbre en los modelos de despacho hidrotérmico empleados para el planeamiento energético se debe realizarse a partir de simulaciones utilizando series sintéticas de caudales hidrológicos, las cuales tiene su incertidumbre intrínseca en su misma generación y utilizar sus resultados a partir de los percentiles asociados a las variables de salida de la simulación.

En este orden de ideas, las incertidumbres asociadas a los balances energéticos pueden desligarse de las relacionadas con el uso de los modelos de simulación utilizados para el planeamiento, no debiendo introducirse variables de “compensación” provenientes del desbalance energético potencial diario, como se hace actualmente a través de la incorporación del riego en dicho tipo de modelos.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

