



Análisis de las Desviaciones de los Balances Hídricos – Energéticos

27 de julio de 2016

1. Antecedentes

Desde El Niño 2009-2010, se empezó a utilizar el término de desbalances hídricos para el planeamiento energético realizado por XM, y se calculó un estimado de 14 GWh diarios, a partir de un periodo de la historia reciente de los aportes, reservas y generación de las centrales hidroeléctricas.

Desde ese momento, el Subcomité Hidrológico, consciente del impacto de estos balances en el análisis energético, y por solicitud del CNO, inició diferentes análisis sobre la metodología de cálculo de estos balances y las variables que intervenían en la misma, con el objeto de verificar el valor real de los balances y de ser posible, identificar las medidas para disminuir este valor.

A continuación se describen los diferentes análisis que se han hecho en el Subcomité Hidrológico en varias reuniones desde el 2009 hasta el 2015, incluyendo las conclusiones de las consultas que se hicieron con empresas externas sobre este tema.

2. Cálculo de la desviación en el Balance Energético

La desviación en el Balance Energético Diario, D_i , se calcula así:

Todas las plantas

$$D_i = \sum_{j=1}^{n} d_{ij} \quad \text{Alternativamente:} \quad D_i = W_{Ti-1} + \sum W_{QT} - \sum W_{GT} - \sum W_{VT}$$

W_{Ri-1} Volumen reportado (Mm³ o GWh) a las 0:00 del día anterior. W_{GT} Volumen de agua utilizada para la Generación de energía durante el día anterior. En energía se asume igual a la generación.

W_{QT} Volumen aportado por los afluentes a un embalse durante el día anterior. W_{VT} Volumen de agua vertida durante el día anterior.

Para el SIN el balance energético se hace en energía.

Como ejemplo de su cálculo se tienen las siguientes cifras reales:

	OPESIN					
FECHA	Vol Útil Diario [GWh]	Aportes diarios [GWh]	Generación [GWh]	Vertimientos [GWh]	Vol Útil TEÓRICO [GWh]	Desviación [GWh]
Junio 7/2010	7780.56					
Junio 8/2010	7764.07	140.19	161.59	0.45	7758.71	-5.36

En esta primera aproximación para el SIN no se incluyen descargas diferentes a vertimientos y generación. Igualmente, se asume que la generación hidráulica se presenta en centrales asociadas con embalse.

La desviación promedio fue estimada en 14 GWh/día en el año 2009, pero en periodos de invierno las desviaciones son mayores.

3. Análisis Variables que Intervienen en el Cálculo del Balance Hídrico

La determinación de las variables que intervienen en el balance hídrico de los embalses asociados con las plantas de generación de energía, tiene implícitas varias imprecisiones que no permiten determinar con exactitud las reservas de energía almacenada, así como las variables que hacen parte de este cálculo. Ello se debe principalmente a:

- a. El Factor de Conversión - F_c - (utilizado para calcular el caudal descargado por generación) por las siguientes razones principales:
 - El valor de F_c para el cálculo de las reservas es un parámetro fijo.
 - Su determinación tiene una incertidumbre asociada.
 - El F_c se determina unidad por unidad o a toda la planta en su conjunto. El promedio podría estar generando mayores imprecisiones en el cálculo del F_c de cada planta.
 - El F_c se determina con los niveles durante los últimos cinco años, por lo que no habiendo algunos embalses descendido hasta cotas cercanas al nivel mínimo técnico no es posible medir este parámetro en dicha franja.
 - Las reservas consideran un F_c único pero el F_c varía en función del nivel del embalse en la mayoría de las plantas (posible mejora)
 - Se utiliza un F_c único para estimar las reservas en cadena (el nivel de todos los embalses en dicha cadena se asume en el nivel correspondiente al F_c mediano)
- b. Deficiencias en la estimación del caudal en el sitio de presa basado en el caudal de entrada al embalse.
- c. Deficiencias en las ecuaciones de regresión utilizadas para el traslado de caudales de una estación a otra.
- d. Incertidumbre en las mediciones hidrométricas, aun con equipos de tecnología de punta.
- e. El balance hídrico no puede contemplar todas las variables (evaporación, infiltración, precipitación, etc.) y todas las variables del balance poseen a su vez incertidumbre.
- f. Cambios en el volumen útil o total del embalse que generan diferencias importantes en el balance y solo se identifican cuando se actualiza la batimetría.
- g. Dificultades inherentes a las topologías complejas de las diferentes cadenas.
- h. Imprecisión en la medición del volumen de embalse a partir del nivel esto es, a mayor tamaño, mayor incertidumbre en el volumen.

4. Estimación del Aporte al Embalse

Los caudales de entrada definidos como aportes a un embalse pueden ser estimados mediante medición directa o estimación a partir de un balance de agua; a continuación se describen ambos métodos y las restricciones involucradas en cada caso.

a. Medida directa del caudal

La medición del caudal se realiza utilizando estaciones de medición de nivel del río en los principales afluentes al embalse (no es posible medir todos los afluentes por imposibilidad técnica y /o por costos); los niveles se transforman en caudales mediante curvas de calibración que relacionan el caudal en el río a partir de diferentes niveles y finalmente por medio de una ecuación se traslada el caudal hasta el sitio de captación, dado que las estaciones sólo pueden operar en las cabeceras del embalse (Figura 1)

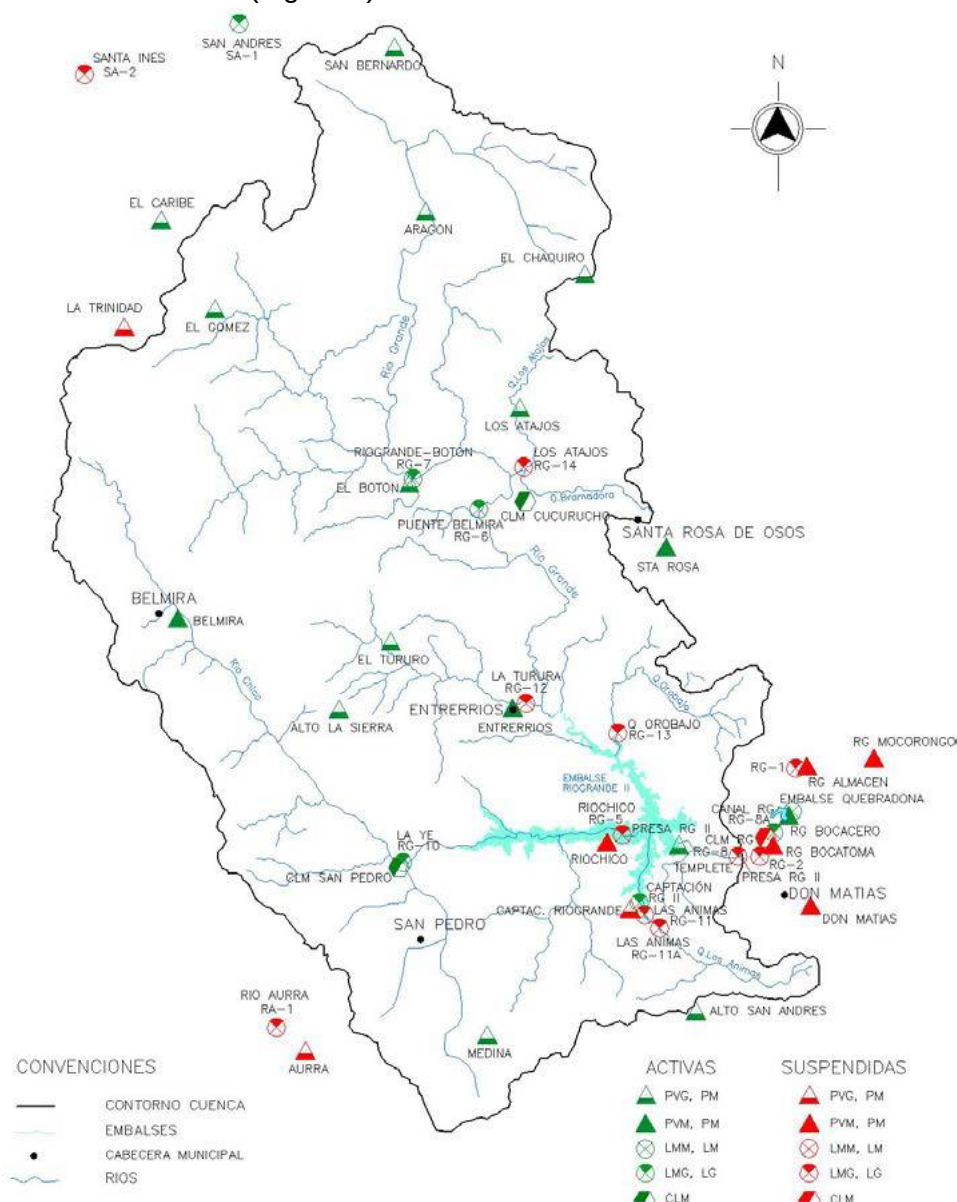


Figura 1. Plano de ubicación de estaciones de caudal, precipitación y climatológicas en la cuenca tributaria al embalse Río Grande II.

Deficiencias medición directa del caudal:

- **Curva de calibración de la estación limnimétrica:** La curva de calibración es necesaria para transformar las medidas de nivel de la estación, en caudales. Esta curva se construye a partir de varias mediciones in-situ, denominadas aforos, las cuales se realizan para diferentes niveles del río. Una vez se tienen mediciones en niveles bajos, medios y altos del río, se realiza una estimación de la curva que mejor se ajusta a estos valores, utilizando ajustes estadísticos y ecuaciones físicas para proyectar la curva para los valores de niveles del río en los cuales no haya sido posible realizar mediciones.

Teniendo en cuenta que la curva obtenida obedece a una medición particular para diferentes niveles, y que se está hablando del mejor ajuste, se debe considerar la incertidumbre asociada al procedimiento de cálculo, tanto de las mediciones como de los ajustes, por lo que estas curvas siempre tienen una banda de incertidumbre asociada.

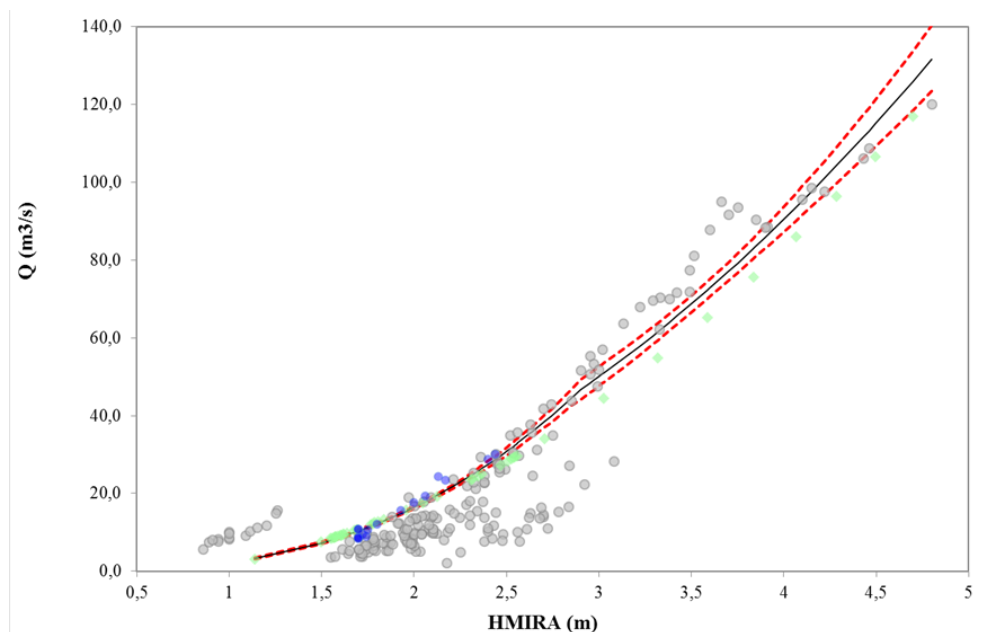


Figura 2. Gráfica con la ubicación de los aforos y la estimación de la curva de calibración y los rangos de incertidumbre asociada a dicha curva

- **Cálculo del Caudal en un Río – Aforo Hidrométrico:** existen varias metodologías para la el cálculo del caudal de un río, realizando mediciones in-situ. Se pueden realizar aforos por vadeo o por suspensión, dependiendo del tipo de río y de

sección. A continuación se describe la metodología utilizada para el cálculo del caudal a partir de las mediciones realizadas en un aforo y las limitaciones del método.

El cálculo del caudal de un río a partir de un aforo se lleva a cabo determinando la velocidad del agua y el área de la sección transversal y utilizando la siguiente expresión:

$Q = V \times A$ donde:

Q : caudal de la sección del flujo, en m^3/s

V : velocidad media de la sección, en m/s

A : área de la sección, en m^2

El método de área – velocidad subdivide el flujo en diferentes secciones individuales así:

$$q_s = V_s A_s \rightarrow Q = \sum_{s=1}^n q_s$$

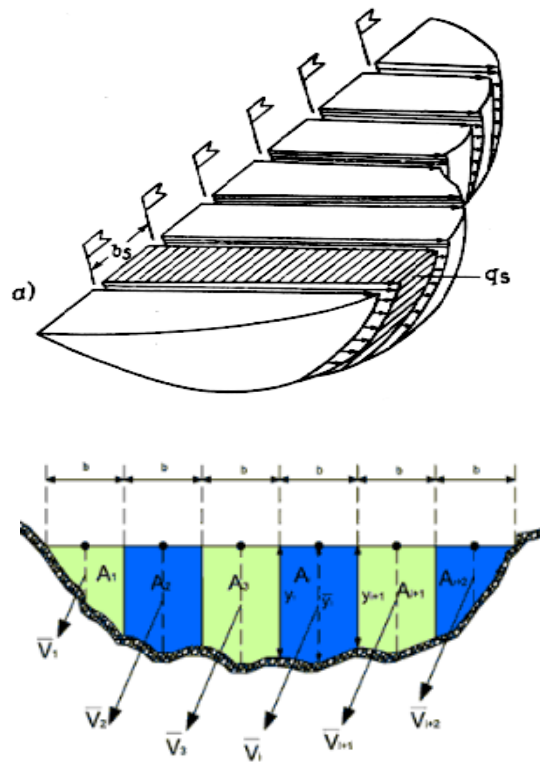


Figura 3. Modelo área – velocidad

En cada sección individual se mide la velocidad media del flujo y su área y luego se determina el caudal total para toda la sección transversal.

Como se deduce de la metodología presentada, el cálculo del caudal medido en un determinado instante, depende la sección del río, por lo tanto, si la sección cambia, el caudal para un mismo nivel va a cambiar también. Los cambios en una sección se pueden presentar de manera súbita, resultado de una creciente que

deposite sedimentos que se encontraban aguas arriba del sitio de medición. Estos cambios ocurren continuamente, por lo que la medida del aforo se realiza en varias ocasiones para ir ajustando la curva de calibración periódicamente y reducir con ello la imprecisión del método.

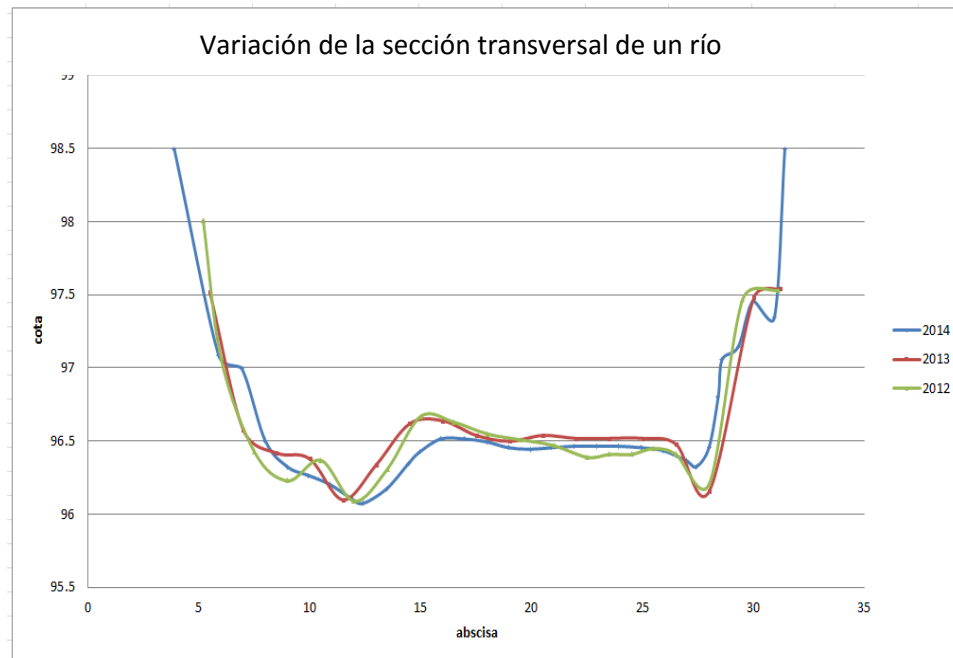


Figura 4. Variación en el tiempo de las secciones transversales de un río en un sitio de medición

Con el objeto de tener un levantamiento de la totalidad de la sección y de tener datos de velocidad y área de cada punto dentro de la sección transversal del sitio de medición, se han empezado a utilizar equipos con tecnología de punta, llamados ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) que mejoran la medida del caudal durante el aforo.

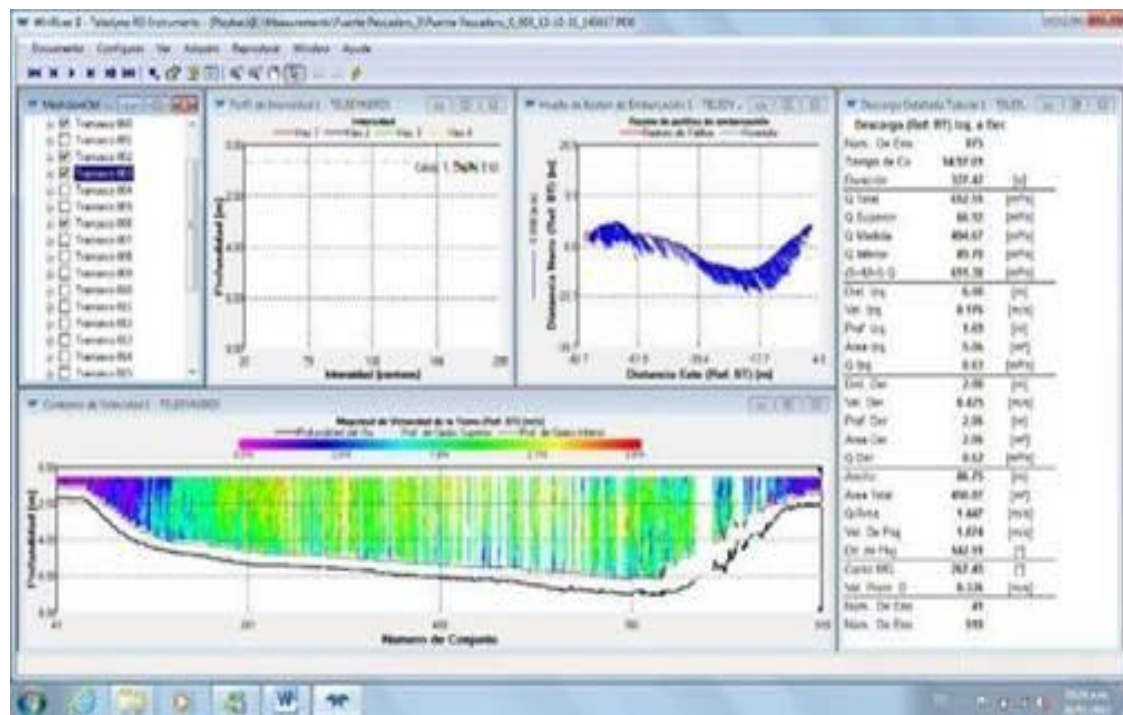


Figura 5. Resultados de un aforo realizado con una ADCP

b. **Cálculo a partir de balance hídrico.** La siguiente es la ecuación general utilizada para realizar este cálculo:

$$Q_{natural} = (V_f - V_i) + V_{turbinado} + V_{vertido} + V_{descargas}$$

$V_f - V_i$: Se refiere a la diferencia entre el volumen del embalse medido a las 0 horas del día y el volumen medido a las 0 horas del día siguiente.

El balance se ve afectado y puede diferir significativamente del aporte real por:

- Imprecisión en el volumen del embalse.
- Imprecisión en medición de Vertimientos (Medición de nivel).
- Imprecisión en medición del caudal de las descargas de fondo (Medición).
- Imprecisión en medición de caudal por generación (**Fc**).

Las deficiencias en la estimación del volumen del embalse pueden deberse a las batimetrías, las cuales se realizan de acuerdo con el protocolo aprobado por el Subcomité Hidrológico y por el CNO mediante el Acuerdo 565. Cada una de las mediciones que se describen dentro del protocolo tiene una incertidumbre inherente al equipo y al procedimiento, lo cual hace que en el momento de calcular para un determinado nivel del embalse el volumen correspondiente, se tenga una incertidumbre a considerar.

5. Utilización del Factor de Conversión Fc

- **Para una planta**

Como se ha observado, el Factor de Conversión es utilizado tanto en el cálculo de los caudales naturales afluentes a una central hidroeléctrica, como en el cálculo de las desviaciones de los balances energéticos.

En este punto es importante resaltar que la metodología utilizada para el cálculo de la curva del factor de conversión, descrita en el protocolo del Acuerdo 694, se basa en cuatro (4) mediciones puntuales, bajo unas condiciones específicas de operación de la planta. Por lo tanto, cuando se calcula este parámetro en diferentes niveles del embalse y bajo condiciones diferentes de operación, se obtienen valores que pueden alejarse de la curva calculada siguiendo el procedimiento.

En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan ejemplos de los valores obtenidos para el factor de conversión para diferentes niveles del embalse para las centrales de Guatapé y Porce II.

Figura 6. Fc. Central Guatapé

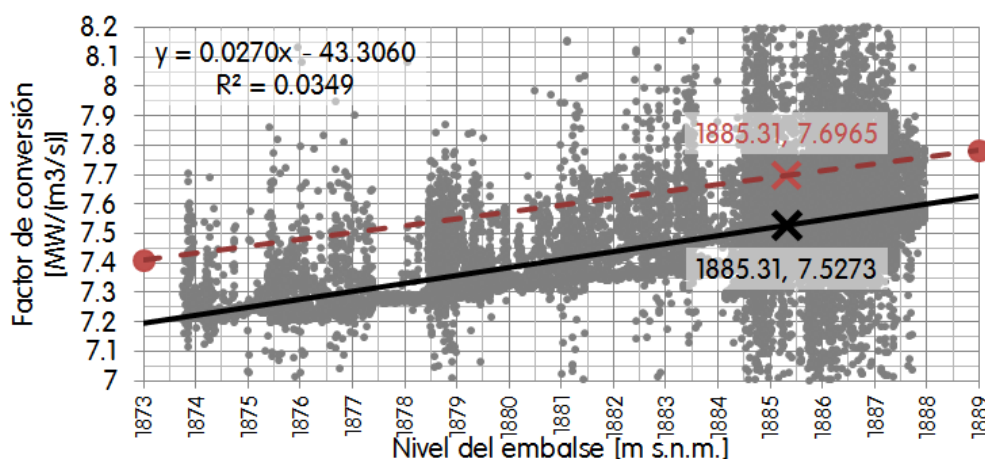


Figura 6. Fc. Central Guatapé

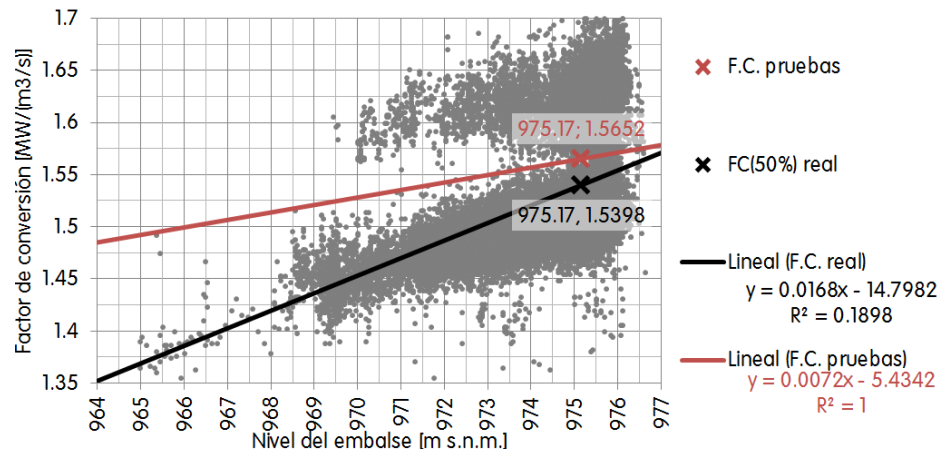


Figura 7. Fc Central Playas

- **Para una cadena**

Para el caso de una cadena de centrales hidroeléctricas, se incrementan el número de variables que aumentan la incertidumbre del cálculo de las desviaciones de los balances hídricos, tales como:

- FC cadena
- Tiempos de viaje del agua
- Simultaneidad medidas
- Incorporación de todas las intervenciones (acueducto, riego, trasvases...)
- Modelamiento

Como ejemplo, en las Figuras 9 y 10 se presentan las cadenas Nare – Guatapé y Paraíso – La Guaca

6. Conclusiones

- Del análisis del Subcomité hidrológico se encontró que existen varias incertidumbres que agregadas generan una imprecisión importante en el balance hidráulico, que técnicamente no es posible mejorar, a pesar de que los agentes tienen implementadas diferentes metodologías de medición, en muchos casos con tecnología de punta
- Debido a lo anterior, el Subcomité consideró que no se debían catalogar estas imprecisiones como pérdidas, ni tampoco era posible definir una magnitud para las mismas a partir del balance hídrico, sin incurrir en una aproximación que podría no ser la más adecuada
- No es posible lograr desbalance cero con volúmenes de agua y tampoco en términos energéticos por incertidumbres, imprecisiones de medidas, simultaneidad de medidas en embalses en cadena, tiempos de viaje entre embalses, etc.
-
- El Subcomité Hidrológico recomendó a la CREG realizar un estudio mediante el cual se cuantificara la incertidumbre de las variables consideradas en los balances y se tuviera como producto final el rango en el cual se encuentran estas incertidumbres en un escenario normal, teniendo en cuenta las épocas de lluvia y sequía del año

7. Acciones en marcha para una mejor estimación energética

- Verificar que la ecuación de balance contenga todos los elementos que componen la topología hidráulica de cada central (entradas y salidas)
- Caracterizar los valores del desbalance energético ante diferentes condiciones climáticas (estaciones de lluvia y de verano) mediante un análisis estadístico
- Implementación de recomendaciones de Ingfofol

8. Del análisis del balance hídrico y energético

- Concluir atención de recomendaciones Ingfofol (SH)
- Estandarización de medidas para aportes, descargas, vertimientos y nivel de embalse (Explorar un posible acuerdo para homologación de medidas – Recomendación del Comité de Operación) (SH)
- Referenciamiento en otros sistemas en los temas de cuantificación energética, Factores de Conversión y homologación de medidas (SH-SPO-SP)
- En la cuantificación energética, ahondar en el análisis de los siguientes aspectos, a la luz del análisis energético:
 - Métodos de cuantificación de reservas energéticas
 - Resolución del análisis (diaria, semanal, mensual)
 - Modelos utilizados para el análisis energético y capacidad de representar la realidad (sistemas hidráulicos en cadena)
 - Limitante de la cuantificación energética

9. Referenciamiento internacional

- El SH llevó a cabo una visita a Manitoba Hydro (MH) con el fin de identificar si se habían encontrado con un problema similar y las acciones que habían implementado para solucionarlo.
- En general se observó que MH utiliza las mismas metodologías y equipos para la medición de variables. Adicionalmente utilizan un software de manejo de información hidrológico (WISKI), el cual les permite mantener la información disponible y confiable para todos sus grupos de trabajo.
- MH realiza una planeación energética de corto, mediano y largo plazo, utilizando los pronósticos de caudales y de demanda, estimando sus recursos energéticos mediante el uso del Coeficiente de Producción (CP).
- MH hace una verificación periódica del desempeño de su CP, mientras que en el Sistema Colombiano se trabaja con el Fc mediano, el cual se actualiza anualmente, pero con la misma curva de Factor de Conversión, la cual se actualiza cada seis (6) años.
- Los estimativos de energía almacenada que hace MH son considerados como un indicador para el seguimiento general del sistema, y en ningún momento realizan una verificación de las reservas iniciales y finales.
- Es recomendable que el CNO analice la posibilidad de realizar una consultoría enfocada a revisar el manejo que se le hace al Fc en el sistema Colombiano. Para este análisis, se considera importante tener en cuenta el enfoque que podría darle en este tema Manitoba Hydro, debido a que tiene una alta experiencia en la operación de centrales y planeamiento operativo.
- Es importante resaltar que MH realiza la planeación de su expansión hidráulica pensando en la atención de la totalidad de su demanda durante el mayor déficit hídrico que se ha presentado en la historia.