

PROTOCOLO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE PLANTAS HIDRÁULICAS

Febrero 2021

TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVO	5
2. ÁMBITO DE APLICACIÓN.....	5
3. DEFINICIONES.....	5
4. CONSIDERACIONES GENERALES	7
5. PROCEDIMIENTO PARA PLANTAS (CON EMBALSE O FILO DE AGUA) CON MÁS DE SEIS (6) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL.....	8
5.1 PLANTAS CON EMBALSE.....	8
5.1.1 NIVELES DEL EMBALSE PARA LOS CUALES SE REALIZAN LAS PRUEBAS.....	8
5.1.2 VARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS BANDAS DE TOLERANCIA ASOCIADAS A LOS NIVELES DE LOS PERCENTILES PARA LOS QUE SE REALIZARÁN LAS PRUEBAS.....	8
5.2 PLANTAS FILO DE AGUA.....	10
6. PLANTAS CON EMBALSE Y FILO DE AGUA QUE TENGAN MENOS DE TRES (3) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL	10
7. PLANTAS (CON EMBALSE Y FILO DE AGUA) QUE TENGAN MÁS DE TRES (3) Y MENOS DE SEIS (6) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL	10
8. PROCEDIMIENTO PARA LAS PLANTAS HIDRÁULICAS (CON EMBALSE O FILO DE AGUA) NUEVAS, ESPECIALES, GPPS QUE NO HAN ENTRADO EN OPERACIÓN COMERCIAL.....	11
8.1 PLANTAS CON EMBALSE.....	12
8.2 PLANTAS FILO DE AGUA.....	12
9. UNIDADES QUE HAYAN SIDO REINCORPORADAS AL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL (SIN) Y A LAS CUALES NO SE	



Consejo Nacional de Operación

LES HAYA REALIZADO LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN	12
10. CASOS ESPECIALES Y SOLICITUD DE AMPLIACIÓN DE PLAZO	13
11. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN	14
12. ASPECTOS OPERATIVOS Y COMERCIALES	15
13. VIGENCIA	15
14. PROCEDIMIENTO PARA LA PRESENTACIÓN INICIAL O MODIFICACIÓN DE LA CURVA DE FACTOR DE CONVERSIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN MEDIANO	15
15. AUDITOR	16

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO No. 1.** PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CUATRO NIVELES (COTAS) CARACTERÍSTICOS DEL EMBALSE EN LOS CUALES SE REALIZARÁ LA PRUEBA DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO.
- ANEXO No. 2.** PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO.
- ANEXO No. 3.** MEDIDA DE CAUDAL TURBINADO POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO.
- ANEXO No. 4.** PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE INYECCIÓN DE TRAZADORES.
- ANEXO No. 5.** PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE AFORO HIDROMÉTRICO.
- ANEXO No. 6.** PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES, UTILIZANDO EL MÉTODO DE DIFERENCIA DE PRESIONES.
- ANEXO No. 7.** PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO Y EL CÁLCULO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO MEDIANO.
- ANEXO No. 8.** FORMATOS PARA LA TOMA DE DATOS EN EL SITIO Y CÁLCULO PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS.

1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para determinar la función del Factor de Conversión Hidráulico a partir del nivel del embalse, calcular el Factor de Conversión Mediano y sus respectivas vigencias.

2. ÁMBITO DE APLICACIÓN

Se aplica a todos los agentes que poseen:

- Plantas de generación hidráulica despachadas centralmente en operación comercial.
- Plantas Nuevas, GPPS, Especiales que no han entrado en operación comercial (Resolución CREG 071 de 2006, o aquellas que la modifiquen o sustituyan¹).
- Plantas que se encuentren en proceso de reincorporación al mercado mayorista.

3. DEFINICIONES

Para efectos del presente documento, se tendrán en cuenta las siguientes definiciones generales relacionadas con la producción de energía eléctrica utilizando la energía del agua:

Agente: Término empleado para referirse al representante comercial o propietario de una planta de generación.

Caída Bruta Máxima: En plantas de generación hidroeléctricas que tengan como equipamiento turbinas Pelton, es la diferencia entre el Nivel Máximo Físico y la cota del *center line* del rodete de las turbinas. En plantas de generación hidroeléctricas que tengan turbinas Francis, para los propósitos de este Protocolo, será la comprendida entre el Nivel Máximo Físico y el nivel del agua en la descarga correspondiente a las condiciones de diseño de la central.

¹ De acuerdo con lo establecido en la Resolución CREG 071 de 2006 o en aquellas que la modifican o sustituyan, se consideran las siguientes definiciones:

- Se entiende por plantas hidráulicas nuevas aquellas que no han iniciado la etapa de construcción al momento de efectuar la subasta del Cargo por Confiabilidad o el mecanismo que haga sus veces.
- Se entiende por plantas hidráulicas especiales las que se encuentran en proceso de construcción o instalación a la fecha de realización de la subasta de Cargo por Confiabilidad o aquella que haga sus veces y las instaladas que vayan a ser repotenciadas, siempre y cuando cumplan con lo establecido en la reglamentación vigente.
- Se entiende por plantas GPPS las plantas y/o unidades de generación con períodos de construcción superiores al período de planeación de la subasta del Cargo por Confiabilidad o el mecanismo que haga sus veces.

Curva FC Nueva: Curva de factor de conversión que se presenta para aprobación, producto de la última prueba realizada.

Curva FC Vigente: Curva de factor de conversión aprobada mediante acuerdo CNO.

Embalse Multipropósito: Embalse con regulación superior a 1 día utilizado para más de un (1) propósito, por ejemplo: energía + acueducto, energía + riego, acueducto + energía + riego, etc.

Factor de Conversión Hidráulico (FC): Relación entre la potencia eléctrica generada neta y la unidad de caudal necesaria para generar esa potencia, para una cabeza hidráulica determinada. Expresándose en $MW/(m^3/s)$.

Factor de Conversión Hidráulico Mediano (FC_m): Factor de conversión más representativo de la planta de generación, que será utilizado cuando se requiera un valor único para efectos de modelación de la energía contenida en el embalse y/o la energía contenida en los aportes de los ríos afluentes. Es el factor de conversión asociado a un nivel del embalse correspondiente a la mediana de los registros históricos existentes de los niveles diarios reportados al CND durante los últimos seis años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril.

Nivel del Embalse (H): Elevación (cota) de la superficie libre del agua en el embalse, tomada en relación con el nivel del mar (m.s.n.m.). Para efectos del presente Protocolo el nivel del embalse corresponde al valor reportado diariamente por cada empresa al Centro Nacional de Despacho, en adelante CND.

Nivel Máximo Físico (NMF): Elevación máxima de la superficie del agua del embalse sin que ocurra vertimiento. Está definida por la cota de la cresta del vertedero, o la cota superior de compuertas, o debajo de dichas cotas, si existe alguna restricción en la estructura hidráulica.

En el caso de vertederos con compuertas sumergidas, en los cuales el nivel del embalse puede subir por encima de la cota superior de compuertas sin que ocurra vertimiento, el nivel máximo físico será definido por la cota de la estructura donde empieza el vertimiento o debajo de ésta si existe alguna restricción.

En cualquier caso, el agente deberá tener en cuenta las condiciones de seguridad de las estructuras hidráulicas. (La definición de NMF se encuentra también en el Acuerdo 1321 de 2020 o aquel que lo modifique o sustituya).

Nivel Mínimo Técnico (NMT): Elevación de la superficie del agua en el embalse hasta la cual puede utilizarse su agua, cumpliendo con condiciones de seguridad en las estructuras hidráulicas y en las instalaciones de generación para plena carga de todas las unidades. (La definición de NMT se encuentra también en el Acuerdo 1321 de 2020 o aquel que lo modifique o sustituya).

Planta Filo de agua: Se considerarán plantas filo de agua las plantas hidráulicas despachadas centralmente que cumplan con una de las siguientes condiciones:²

“

² Tomado de la Resolución CREG 060 de 2019.

- i. Que no posea embalse y que su estructura de captación esté conectada directamente a la fuente de agua para que tome parcial o totalmente el caudal de dicha fuente o,*
- ii. Que la central posea embalse cuyo tiempo de vaciado, generando con su Capacidad Efectiva Neta, CEN, considerando el aporte promedio multianual e iniciando con embalse en el máximo técnico, calculado según el Acuerdo 512 del CNO o aquellos que lo modifiquen, sea menor o igual a un (1) día, o si el tiempo de llenado generando con dicha capacidad efectiva neta y con el aporte promedio multianual iniciando con el embalse en el mínimo técnico, calculado según el Acuerdo 512 del 2010 o aquellos que lo modifiquen, sea menor o igual a un (1) día.*

Adicionalmente, no se considerarán filo de agua las centrales hidroeléctricas que estén situadas aguas abajo de embalses que le garanticen regulación de caudales mayor a un (1) día. En este caso, se entiende como tiempo de regulación el calculado mediante el criterio indicado en el párrafo anterior”³

Para los propósitos de este Protocolo también se considerarán como Plantas Filo de agua, las plantas hidroeléctricas que aun estando situadas aguas abajo de embalses que le garanticen regulación de caudales mayor a un (1) día, cumplan con cualquiera de las condiciones definidas en los literales anteriores; debido a que dichas plantas no pueden realizar mediciones de FC en más de un (1) punto.

Potencia Eléctrica (N): Potencia neta producida al paso del agua por la turbina de una planta de generación.

4. CONSIDERACIONES GENERALES

Para la estimación de la función del FC en relación con el nivel en el embalse y el FC_m , se utilizará el procedimiento previsto en el Anexo No. 7 del presente Protocolo.

En cualquiera de las tres (3) variantes, para la construcción de la gráfica que elaborará el auditor, se deberá seguir lo indicado en el Anexo No. 7 de este Protocolo.

Los percentiles y la variante elegida por el agente para calcular la banda de tolerancia (BT) definidos al inicio de las pruebas no cambiarán, cuando durante la realización de la totalidad de las pruebas o por motivos de ampliación del plazo aprobado por los subcomités, se presente un cambio de año.

Los formatos para la toma de datos en el sitio y cálculo para cada una de las pruebas se muestran en el Anexo No. 8 de este Protocolo.

Como resultado de estas pruebas se obtendrá la función del FC de una planta en relación con el nivel del embalse asociado y el FC_m , los cuales serán calculados de acuerdo con el Anexo No. 7 de este Protocolo.

Una vez obtenida la curva del FC versus nivel del embalse, para efectos de los modelos de planeamiento energético que utilizan una relación entre el volumen del embalse y el FC hidráulico, el agente calculará y entregará al CND una tabla con 5 puntos en donde se

³ El acuerdo 512 fue modificado con el 1321 del 30 de junio de 2020.

registren los siguientes datos del embalse: cota, volumen y FC (tomado de la Curva FC Nueva). Los 5 puntos corresponderán a los volúmenes asociados al 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del volumen útil.

5. PROCEDIMIENTO PARA PLANTAS (CON EMBALSE O FILO DE AGUA) CON MÁS DE SEIS (6) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL

De acuerdo con las particularidades de la planta, el agente podrá realizar las pruebas a cada una de las unidades de la planta de forma individual, o a toda la planta en conjunto. De igual manera, escogerá un único método para la medición del caudal que pasa a través de la conducción de carga, entre los métodos que se presentan en los Anexos No. 3, 4, 5 o 6 del presente Protocolo. En aquellas plantas en las que se puedan efectuar las pruebas de varias unidades simultáneamente, pero con datos individuales por unidad, será opción del agente programarlas y ejecutarlas cumpliendo con los requisitos de los valores instantáneos y los valores acumulados de que tratan los Anexos No. 2 y 8 del presente Protocolo.

5.1 PLANTAS CON EMBALSE

5.1.1 NIVELES DEL EMBALSE PARA LOS CUALES SE REALIZAN LAS PRUEBAS

El agente seleccionará los niveles del embalse en los cuales se realizará la medición del FC de la planta, usando la información disponible de los niveles diarios del embalse (cotas en metros sobre el nivel del mar) para los últimos seis (6) años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril. Se deberá utilizar el procedimiento previsto en el Anexo No. 1 de este Protocolo y se calcularán los cuatro (4) niveles característicos para los cuales se harán las pruebas del FC.

Será potestad del agente realizar pruebas en niveles adicionales a los cuatro (4) niveles característicos descritos en el Anexo No. 1, con el fin de mejorar la confiabilidad en la obtención de la función del FC y su representatividad a lo largo del rango de variación del nivel del embalse. Las pruebas en niveles adicionales a los descritos en el Anexo No. 1, serán realizadas en niveles superiores o inferiores al máximo o mínimo respectivamente, de los cuatro (4) percentiles allí definidos. Estas pruebas, igualmente auditadas, serán tenidas en cuenta para la obtención de la función del FC de la planta.

5.1.2 VARIANTES PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS BANDAS DE TOLERANCIA ASOCIADAS A LOS NIVELES DE LOS PERCENTILES PARA LOS QUE SE REALIZARÁN LAS PRUEBAS

Para llevar a cabo las mediciones, cada agente establecerá una banda de tolerancia (BT) para el nivel de cada percentil, utilizando una de las siguientes variantes:

5.1.2.1 Variante 1

Para llevar a cabo las mediciones de cada prueba, el agente tendrá una banda de tolerancia (BT) en los niveles, la cual será calculada de la siguiente manera:

- Percentil 90: Estará entre los niveles asociados a los percentiles 95 y 85.
- Percentil 75: Estará entre los niveles asociados a los percentiles 80 y 70.
- Percentil 50: Estará entre los niveles asociados a los percentiles 55 y 45.
- Percentil 25: Estará entre los niveles asociados a los percentiles 30 y 20.

5.1.2.2 Variante 2

Para llevar a cabo la prueba correspondiente al nivel de un determinado percentil, el agente dispondrá de una banda de tolerancia (BT), la cual será equivalente al cinco por mil de la Caída Bruta Máxima de la central, por encima o por debajo del nivel del percentil para el que se realizará la medición ($\pm 0,5\%$ de la Caída Bruta Máxima). Esta banda se desplazará verticalmente a lo largo del rango de variación histórica de los niveles del embalse de los últimos seis (6) años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril.

Cuando en algún momento esta BT abarque los niveles de dos o más percentiles contiguos definidos para la realización de las pruebas, se podrá hacer la prueba en cualquier nivel del embalse dentro de esta banda y esta medición reemplazará las mediciones de los percentiles cubiertos dentro de la misma.

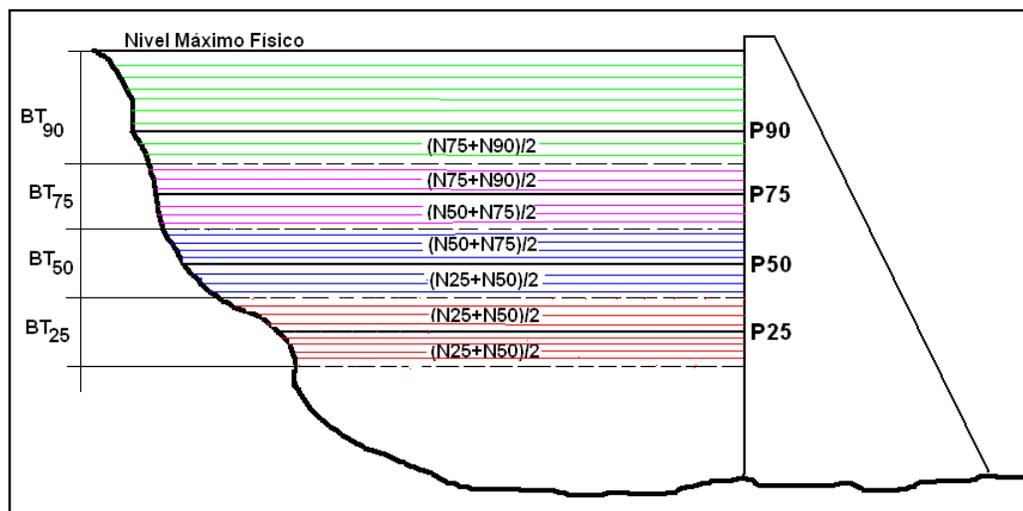
En todo caso se deberán garantizar al menos dos mediciones en distintos niveles del embalse, las cuales deberán estar separadas entre sí más del 30% de la diferencia entre el nivel mínimo de la BT del percentil 25% y el nivel máximo de la BT del percentil 90%. Se aclara que previo a la estimación del 30%, se debe revisar que ningún percentil o sus BT se encuentren por encima del NMF o por debajo del NMT, y cuando esto suceda, se acotarán con el valor respectivo, tampoco deberán estar por encima del nivel máximo, ni por debajo del nivel mínimo observado durante los 6 años de análisis.

5.1.2.3 Variante 3

Para llevar a cabo las mediciones de cada prueba, el agente tendrá una banda de tolerancia (BT) en los niveles, la cual será calculada de la siguiente manera:

- Percentil 90: Estará entre el NMF y el promedio entre los niveles asociados a los percentiles 90 y 75.
- Percentil 75: Estará entre el promedio de los niveles asociados a los percentiles 90 y 75; y el promedio entre los niveles asociados a los percentiles 75 y 50.
- Percentil 50: Estará en el promedio entre los niveles asociados a los percentiles 75 y 50; y el promedio entre los niveles asociados a los percentiles 50 y 25.

- Percentil 25: Estará en el promedio entre los niveles asociados a los percentiles 50 y 25; y el NMT.



5.2 PLANTAS FILO DE AGUA

Las Plantas Filo de agua tal como están definidas en el numeral 3 de este Protocolo, estimarán su factor de conversión con una sola prueba de acuerdo con lo previsto en el Anexo No. 2. Para ejecutar la prueba no se exigirá un nivel específico de agua en las estructuras de captación.

6. PLANTAS CON EMBALSE Y FILO DE AGUA QUE TENGAN MENOS DE TRES (3) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL

Se adoptará el FC teórico reportado por el agente al CND, según lo previsto en el numeral 8; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del presente Protocolo, teniendo en cuenta si tiene embalse o es filo de agua.

7. PLANTAS (CON EMBALSE Y FILO DE AGUA) QUE TENGAN MÁS DE TRES (3) Y MENOS DE SEIS (6) AÑOS DE OPERACIÓN COMERCIAL

El FC para plantas con embalse se calculará siguiendo los lineamientos que se describen a continuación:

- Las pruebas deberán realizarse una vez el agente disponga de 3 años continuos de registros diarios de nivel de embalse, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril. Con esta información calculará los percentiles de acuerdo con lo establecido en el numeral 5.1.1, y las bandas de tolerancia (BT) según lo previsto en el numeral 5.1.2 del presente Protocolo.

- Los resultados de las pruebas deberán presentarse a más tardar en el quinto año de operación, siguiendo el procedimiento previsto en el numeral 14 del presente Protocolo.
- El procedimiento para la realización de las pruebas será el mismo que se aplica para las plantas con más de 6 años de operación (numeral 5 del presente Protocolo), incluyendo los casos especiales que apliquen, de acuerdo con lo previsto en el numeral 10 de este Protocolo.
- La curva FC vs nivel del embalse que resulta de las pruebas servirá para calcular el FC_m tal como se establece en el Anexo No. 7 de este Protocolo.
- Cuando se trate de una Planta Filo de Agua que tenga más de tres (3) y menos de seis (6) años de operación comercial, los resultados de las pruebas deberán presentarse a más tardar en el cuarto año de operación, siguiendo el procedimiento previsto en el numeral 14 del presente Protocolo.

8. PROCEDIMIENTO PARA LAS PLANTAS HIDRÁULICAS (CON EMBALSE O FILO DE AGUA) NUEVAS, ESPECIALES, GPPS QUE NO HAN ENTRADO EN OPERACIÓN COMERCIAL

En el procedimiento que aplica para las plantas hidráulicas (con embalse o filo de agua) nuevas, especiales y GPPS, se utilizará como referencia la información histórica diaria de embalses en operación comercial, diferentes a los asociados a plantas filo de agua, que posean información histórica de los últimos seis años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril de las plantas antes mencionadas, que utilicen el mismo tipo de turbinas de las plantas consideradas en este numeral y que sus embalses no estén sometidos a propósitos diferentes a los de la planta a analizar.

El agente debe enviar una comunicación por correo electrónico al Secretario Técnico del CNO en la que le solicita la aplicación de este procedimiento. En la misma comunicación debe informar las características principales de su planta: CEN, número y tipo de turbinas, Caída Bruta Máxima, tipo y propósito del embalse, volumen útil y total del embalse, caudal de diseño, NMT y NMF.

El Secretario Técnico del CNO enviará un correo electrónico a los agentes de plantas con características similares, para que en un plazo de 15 días calendario contados a partir del envío del correo, suministren la siguiente información por correo electrónico: NMT, NMF, y cota asociada al percentil 50 de su serie histórica de niveles, últimos seis años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril.

Vencido el plazo antes mencionado, el Secretario Técnico enviará la información recibida de los agentes al agente interesado.

Este procedimiento se utilizará también para el cálculo del FC_m .

8.1 PLANTAS CON EMBALSE

- a. Con la cota asociada al percentil 50 (P50) entregada por cada agente como ya se indicó, se calcula para cada embalse la siguiente relación expresada en porcentaje:

$$\%Nivel P50 = \frac{Cota P50 - NMT}{NMF - NMT}$$

- b. Se tabulan las relaciones anteriores para todos los embalses en operación, de acuerdo con la información suministrada por el CNO según el procedimiento previsto en el numeral 8 del presente Acuerdo, y se obtiene el promedio aritmético.

El porcentaje encontrado se usa para calcular el percentil 50 de la nueva central. Debe interpretarse como el porcentaje de la diferencia entre el NMF y el NMT, para el embalse asociado a la futura central.

- c. La futura central teniendo el porcentaje y la diferencia de niveles calcula el nivel del P50 así:

$$Cota asociada al P50 (msnm) = NMT + \%nivel P50(NMF - NMT)$$

Los niveles del embalse se expresarán en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m).

- d. Con la cota asociada al P50 entrará a la curva teórica del FC de la planta y encontrará el FC_m (MW/m³/s).

Cuando alguno de los embalses de las plantas objeto de este numeral sea considerado como multipropósito, el procedimiento será el siguiente: se calculará el nivel medio como el promedio aritmético de los doce valores mensuales de la curva guía de operación del embalse. A partir de este nivel medio, se buscará el FC correspondiente en la curva teórica elaborada con base en los estudios realizados por el agente, en la etapa en la que se encuentre la central en el momento de la declaración. Este será también el FC_m .

Las plantas nuevas, especiales y GPPS con embalse reportarán el valor del FC_m , para lo cual deben aplicar anualmente el procedimiento previsto en el presente numeral, lo cual repetirán hasta el momento en el que se hagan las pruebas de medición del FC de acuerdo con lo establecido en el numeral 7 del presente Protocolo.

8.2 PLANTAS FILO DE AGUA

Se adoptará el FC teórico reportado por el agente al CND.

9. UNIDADES QUE HAYAN SIDO REINCORPORADAS AL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL (SIN) Y A LAS CUALES NO SE LES HAYA REALIZADO LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN

Se les deberá realizar la medición conforme a lo establecido en el presente Protocolo.

La serie histórica de niveles para determinar los percentiles para las mediciones será la misma serie utilizada para la medición del FC de las demás unidades de la planta que permanecieron conectadas al SIN.

Las mediciones del FC de las unidades reincorporadas al SIN se considerarán válidas si el promedio de los niveles en el embalse durante las mediciones de todas las unidades (unidades reincorporadas y en servicio), para cada uno de los percentiles definidos, están dentro de los rangos de tolerancia establecidos en el presente Protocolo.

10. CASOS ESPECIALES Y SOLICITUD DE AMPLIACIÓN DE PLAZO

1. Si durante las pruebas objeto de este Protocolo, alguna unidad se halla en mantenimiento, situación que deberá estar debidamente soportada ante el CND, el FC para esta unidad será el menor valor del obtenido para las restantes unidades, asignándole la misma cota obtenida durante las mediciones a aquella unidad.
2. Cuando un agente prevea que por razones fuera de su control, no podrá realizar todas las pruebas durante los últimos dieciocho (18) meses antes de finalizar la vigencia de la curva vigente, deberá informar por escrito al Secretario Técnico del CNO, con una antelación no menor a 60 días calendario a la finalización de la vigencia de la curva, las razones por las cuales no pudo completar la realización de las pruebas y el plazo requerido.

El CNO, previo concepto del Subcomité de Recursos Energéticos Renovables (SURER) y el Subcomité de Plantas, o quien haga sus veces, podrá ampliar por una vez mediante Acuerdo, el plazo para la realización de las pruebas hasta por (1) un año. El agente deberá realizar las pruebas faltantes utilizando los mismos percentiles con los cuales se realizó la primera prueba.

3. Cuando el agente generador no haya podido realizar una o más de las pruebas del FC en el plazo adicional de hasta un (1) año concedido por Acuerdo del CNO, el agente informará por escrito al Secretario Técnico del CNO, con una antelación de mínimo 60 días antes del vencimiento de la ampliación del plazo aprobado mediante Acuerdo, las razones por las que no le fue posible la realización de las pruebas. En este caso, la actualización de la curva de la función del FC se deberá realizar de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Se utilizará como punto de partida para este proceso la función de FC vigente y los resultados de las n pruebas del FC con los que se actualizará dicha función (n mediciones realizadas del nivel del embalse y FC), siendo, en este tipo de casos, $n < 4$.

Para el propósito de este tipo de casos, los FC medidos durante las pruebas se designan como $FCMED_{(i)}$, donde $i = 1, \dots, n$, siendo i una de las n pruebas realizadas.

- Para cada nivel del embalse para el que se hicieron pruebas para actualizar la función del FC, se calculará el valor teórico del correspondiente FC que resulta de la utilización de la función del FC vigente.

De esta forma, para las n mediciones realizadas se calcularán los FC teóricos, $FC_{TEO(i)}$, obtenidos a partir de la función del FC vigente, con $i = 1, \dots, n$, y $n < 4$.

- Para cada nivel del embalse para el que se hicieron pruebas para actualizar la función del FC, se determinarán las diferencias, $d(i)$, entre el FC medido y el teórico, así:

$$d(i) = FC_{MED(i)} - FC_{TEO(i)}$$

Para $i = 1, \dots, n$, con $n < 4$.

- Con base en estos valores se determinará el parámetro S :

$$S = \sum d(i)^2$$

Para $i = 1, \dots, n$, con $n < 4$.

- La actualización de la función de FC vigente se realizará mediante su desplazamiento dentro de los valores de FC medidos, a partir de la minimización del parámetro S antes definido. Para ello se podrá utilizar un algoritmo de optimización que permita la determinación del intercepto del polinomio de la función del FC que minimiza el parámetro S (“intercepto óptimo”).

La función del FC que resulta de esta optimización del intercepto, determinará la nueva función de FC para el período de la vigencia para el cual se realizaron las pruebas que tienen las características correspondientes a este tipo de casos⁴.

11. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN

De acuerdo con las mejores prácticas y según el método escogido por cada agente para la medición del FC de su planta o unidades de generación, se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Los equipos utilizados para la medición de energía deben estar acompañados de los certificados de calibración.
- Para los equipos de medición de caudal, se aceptarán los documentos del fabricante relacionados con la instalación y correcto funcionamiento de los instrumentos.
- Si las mediciones de caudal se efectúan en una estación hidrométrica, durante las pruebas del FC, se deberá efectuar un aforo para validar la curva de gastos vigente. Los caudales se estimarán en función de los niveles observados y la curva de gastos.

⁴ Los parámetros del polinomio que representa la función del FC vigente, diferentes al intercepto, no se modifican en este proceso.

12. ASPECTOS OPERATIVOS Y COMERCIALES

Los aspectos operativos y comerciales de la generación de plantas hidráulicas en etapa de pruebas seguirán los criterios establecidos en la Resolución 121 de 1998 o aquellas que la sustituyan o modifiquen.

13. VIGENCIA

La curva “Cota vs. Factor de Conversión” tendrá una vigencia de seis (6) años, contada a partir de la fecha de expedición del Acuerdo.

El agente podrá hacer nuevas mediciones para la planta y establecer una nueva curva “Cota vs. Factor de Conversión” antes de que se cumpla la vigencia de los seis (6) años, caso en el cual el período de vigencia volverá a iniciar a partir de la fecha de expedición del Acuerdo correspondiente.

Los agentes deben considerar que todas las mediciones se deberán realizar durante los últimos dieciocho (18) meses antes del vencimiento de la vigencia. Cuando el agente determine que no le será posible realizar la totalidad de las pruebas durante este período, seguirá el procedimiento descrito en el numeral 2 del punto 10 de este Protocolo.

La vigencia del FC_m es anual y se calculará todos los años, aplicando la función característica Cota vs. Factor de Conversión, según los criterios incluidos en el Numeral 3. Definiciones.

14. PROCEDIMIENTO PARA LA PRESENTACIÓN INICIAL O MODIFICACIÓN DE LA CURVA DE FACTOR DE CONVERSIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN MEDIANO

Para solicitar la presentación inicial o modificación de una curva nueva del FC y su correspondiente FC_m deberá seguirse el procedimiento previsto en el Acuerdo CNO 1299 o aquel que lo modifique o sustituya. La solicitud de modificación de la curva de factor de conversión deberá tramitarse con antelación al vencimiento de la vigencia de la curva. El agente debe enviar la solicitud al Secretario Técnico del CNO para que el punto sea incluido en la agenda de reunión del Subcomité de Plantas y del SURER para su concepto técnico. Si el Subcomité de Plantas y el SURER dan su concepto técnico favorable, se elaborará el proyecto de Acuerdo que será presentado al Comité de Operación para su recomendación. Si el Comité da su recomendación favorable a la expedición del Acuerdo, el CNO expedirá el Acuerdo por el cual se aprueba la incorporación de la curva nueva de factor de conversión y su correspondiente FC_m , el cual será publicado en la página WEB del CNO.

Para todas las plantas incluidas en el Numeral 2 - ÁMBITO DE APLICACIÓN, y siguiendo el procedimiento que corresponda, los agentes reportarán anualmente al CND la actualización del FC_m a más tardar el 31 de julio de cada año. Esta información será incorporada por el CND como una actualización en la información básica para sus procesos, dentro de los (5) cinco días hábiles a la fecha de radicación de la comunicación en el CND.

15. AUDITOR

Las pruebas de determinación del factor de conversión deben ser auditadas por una de las firmas avaladas por el Consejo Nacional de Operación mediante el Acuerdo 975 del 2017 o el que lo sustituya o modifique.

El auditor deberá verificar los procedimientos realizados, las medidas tomadas y los resultados obtenidos para el FC de la central auditada, de acuerdo con lo establecido en el presente protocolo y debe preparar el informe correspondiente.

El auditor verificará los documentos mencionados en este Protocolo y los incluirá en el informe de auditoría de las pruebas.

Se entiende que el informe de la auditoria es el documento oficial de los resultados de las pruebas y de la curva de Factor de Conversión vs nivel del embalse.

ANEXO No. 1 PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CUATRO NIVELES (COTAS) CARACTERÍSTICOS DEL EMBALSE EN LOS CUALES SE REALIZARÁ LA PRUEBA DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO

El procedimiento general se basa en el análisis de frecuencias de niveles de embalse (elevación de la superficie libre del agua en el embalse en msnm) para los últimos seis (6) años, y la determinación de los valores correspondientes a los percentiles 25, 50, 75 y 90.

Los percentiles se calculan con base en los niveles diarios reportados del embalse para el período de los últimos seis (6) años completos, iniciando el 1 de mayo y terminando el 30 de abril.

Cuando un conjunto de datos ordenado ascendentemente, de tamaño n , se divide en cien partes iguales, los puntos de división reciben el nombre de percentiles. En términos más generales, se entiende por el 100 k -ésimo percentil, el valor por debajo del cual una variable se ha mantenido este mismo porcentaje de tiempo. Por ejemplo, el percentil 20% ($k = 0.20$) corresponde al valor del nivel del embalse por debajo del cual, el embalse se ha mantenido el 20% del tiempo analizado.

El procedimiento para encontrar el nivel de embalse P_k correspondiente al percentil k , a partir del conjunto de datos de tamaño (n) organizados en orden ascendente, es el siguiente:

- a. Calcular la posición i del percentil k mediante el producto de n por k . Si $n*k$ no es un entero, entonces i es el siguiente entero más grande. Si $n*k$ es entero, i es igual a $n*k + 0.5$.
- b. P_k (nivel del embalse que corresponde al percentil k) será:
 - Si i es entero, se cuenta desde la observación más pequeña (dato con la posición uno - 1) hasta hallar el i -ésimo valor, el cual corresponde a P_k .
 - Si i no es un entero, entonces i contiene una fracción igual a un medio, con lo que el valor P_k será el promedio de los datos que ocupan el lugar $n*k$ y $(n*k + 1)$.

Con el procedimiento antes descrito, se encontrarán cuatro niveles de embalse (P_{25} , P_{50} , P_{75} y P_{90}) correspondientes a los percentiles 25, 50, 75 y 90.

Se analizarán los niveles diarios del embalse reportados al CND para el período de los últimos seis (6) años calendarios continuos.

ANEXO No. 2 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO

CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA LAS PRUEBAS

Para cada nivel de embalse en el cual se realizará la prueba representativa para un percentil determinado, la potencia a la cual se hará la prueba será la misma registrada ante el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC).

DOCUMENTOS DE LA PRUEBA

Para la realización de la prueba se requiere la información básica general sobre la planta y las mediciones realizadas.

Los resultados obtenidos serán consignados en tres documentos básicos:

1. Protocolo de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico.
2. Informe de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico.
3. Anexos.

A continuación, se describen estos documentos.

1. Protocolo de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico

Se utilizará un formato para cada prueba realizada, el cual consta de las siguientes secciones:

- a. Información general.
- b. Datos tomados durante las pruebas.
- c. Resultados de las pruebas y anexos.

a. Información general

En esta sección se incluirán los datos generales sobre cada unidad. Es deseable que la firma auditora (**ver numeral 15**) tenga la información aquí incluida, con anterioridad a las pruebas, con el fin de disminuir el tiempo necesario en el sitio.

- **Planta y prueba que se realiza:**

Se anotará el nombre de la planta, el tipo (filo de agua o con embalse regulador), su localización, el número de unidades con que cuenta, la fecha de la prueba, el nombre del agente y el percentil al cual se va a realizar la prueba.

- **Unidades de generación:**

Se anotará el tipo de turbina, fabricante, modelo y fecha de iniciación de la operación comercial, así como el fabricante del generador, capacidad, voltaje y factor de potencia de diseño.

Para cada unidad se anotarán la capacidad bruta (en bornes de generador) y neta (en bornes de alta tensión del transformador principal), tanto nominal como la efectiva con la que cada unidad se encuentra registrada ante el ASIC en el momento de la prueba, así como el total de horas acumuladas de operación y las transcurridas desde el último mantenimiento mayor hasta el día de la prueba.

- **Sistema de medición de caudales:**

Se especificará el método de medición de caudal a ser utilizado durante la prueba.

La medición del caudal utilizado por unidad podrá ser realizada por uno de los siguientes métodos: a) Ultrasonido, b) Inyección de Trazadores, c) Termodinámico, d) Aforo de una sección hidrométrica aguas abajo de la descarga (método hidrométrico) o e) Por diferencia de presiones (método del tubo Pitot). Los métodos de aforo aparecen descritos en forma detallada en los Anexos No. 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

La selección del método de aforo será realizada por cada agente considerando las características propias de cada planta.

Para cada instrumento se anotará la marca, tipo, número de serie, clase y precisión, así como la fecha de las verificaciones - comparaciones periódicas, más reciente (vigente durante la prueba).

- **Sistema de medición de niveles en el embalse:**

Se describe el (los) instrumento(s) utilizado(s) para medir el nivel del embalse.

El nivel del embalse se leerá directamente de los instrumentos que posea el embalse para este fin.

- **Medidores de energía:**

Se incluirán los datos de los instrumentos de medición de energía eléctrica que serán utilizados para la prueba.

Para cada instrumento se anotará la marca, tipo, número de serie, clase y precisión, así como la fecha del certificado de calibración más reciente. El Auditor deberá verificar que esté vigente durante la prueba.

En lo que se refiere a grado de precisión, calibración y certificación de los contadores de energía eléctrica, en todas las plantas se debe dar cumplimiento a lo dispuesto en la reglamentación vigente relacionado con la medición de energía o a los acuerdos establecidos entre el ASIC y cada planta.

Para la prueba se medirá la energía en el contador principal o de respaldo si el principal fue reportado al ASIC con problemas.

b. Datos tomados durante las pruebas

Siempre que fueren técnicamente compatibles con el método de medición adoptado, la prueba tendrá una duración de una hora por unidad y se tomarán las siguientes lecturas:

i. Valores instantáneos

Se tomarán las siguientes lecturas instantáneas con intervalos de diez (10) minutos.

- Potencia, MW en bornes del generador. Esta medición se toma solamente para controlar que la carga de la unidad permanezca constante (la desviación máxima de la carga con relación a la potencia no podrá ser mayor al 2% del promedio de los valores medidos durante la prueba) y no es utilizada en los cálculos del FC hidráulico. Se utiliza el vatímetro propio de la unidad en la prueba. Durante la prueba sólo se permitirá que se presente un dato de potencia mayor a la desviación máxima, en caso de que se presente más de un dato por fuera de este rango, la prueba será rechazada por el Auditor.
- Caudal en m³/s con los instrumentos definidos para el método seleccionado. En caso de utilizar el método hidrométrico se deberá tener en cuenta el tiempo de rezago o viaje del flujo entre el sitio de descarga y el punto de medición del caudal.
- Para el caso de trazadores se utilizará una inyección en el punto medio de la hora.
- Nivel del embalse (en m.s.n.m) usando el medidor propio del embalse. Al inicio de la prueba se debe comprobar que el nivel del embalse esté dentro de la banda de tolerancia (BT) correspondiente a las variantes 1, 2 ó 3 del numeral 5.1.2 del presente Protocolo.

ii. Valores acumulados

Se utilizará un Método Directo para calcular el FC asociado al nivel del embalse. Este método considera cada unidad hidráulica de generación como un sistema "Input-Output" o tipo "caja negra", es decir, se medirá el caudal proporcionado a la unidad generadora y la correspondiente energía entregada por ella a la red del SIN.

Se tomarán los siguientes valores acumulados:

- Se medirá la energía eléctrica neta entregada al SIN en la frontera comercial, utilizando los instrumentos propios de la planta. Esta energía se medirá tomando las lecturas inicial y final del contador de la unidad y haciendo la diferencia. Si el contador está instalado en la salida de alta tensión del transformador principal, estas lecturas se anotarán en la columna Contador No. 1, y el resultado es la energía eléctrica neta. Si el contador está instalado para medir energía generada en bornes de generador y existe un acuerdo legal entre la planta y el Mercado de

Energía Mayorista respecto a la medición de energía eléctrica, se tomarán también las lecturas del contador de auxiliares y se anotarán en la columna Contador No. 2; y si fuese necesario, en la columna Contador No. 3. La energía neta será en este caso la diferencia entre las columnas Contador No. 1 (generación bruta) y la suma de las columnas Contador No. 2 y Contador No. 3 (consumo de auxiliares), en estos casos se deberán tener en cuenta las pérdidas del transformador elevador del generador. Durante la prueba del FC deberán estar en funcionamiento todos los equipos auxiliares propios de la unidad, es decir aquellos que son estrictamente necesarios para que la unidad produzca energía.

- El caudal utilizado en la unidad en el mismo período corresponderá al valor promedio de las seis (6) lecturas tomadas a lo largo de la prueba. Si alguna de las lecturas tiene una desviación superior al 2% del promedio, esta no será tenida en cuenta para el cálculo del promedio, sin que sea causal de rechazo de la prueba, sin embargo, si se presenta más de una lectura por fuera de este rango, la prueba será rechazada por el Auditor. En el caso de utilizar el aforo hidrométrico para el cálculo del caudal, el Auditor podrá optar por realizar al menos una medición del caudal durante la prueba, o tomar las lecturas de los niveles de la sección hidrométrica más cercana (seis lecturas), para la cual se dispondrá de la curva de gastos debidamente calibrada.

La hoja de datos tomados durante la Prueba (Anexo No. 8) será firmada por el agente y por el representante de la firma Auditora.

c. Resultados de las pruebas y anexos

En esta sección del formato se anotarán los datos medidos de caudal utilizado durante el período de la prueba y la generación eléctrica neta en MWh.

El caudal promedio utilizado en la prueba, el nivel promedio registrado en el embalse durante la prueba y la energía neta generada en la hora, serán los datos oficiales usados para la estimación del FC asociado a un nivel determinado. Se entiende que el FC calculado durante la prueba queda asociado con el nivel promedio del embalse durante la misma prueba.

La función del FC se construirá (ver Anexo No. 7) por parte del auditor, una vez se realice la totalidad de las pruebas para los niveles de referencia. (ver Anexo No. 1).

2. Informe de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico

En el Informe de Pruebas se consignará el nombre de la planta, agente, fecha de la prueba y nombre de los representantes del agente y de la firma Auditora que participaron en la ejecución de esta.

Se hará un breve resumen del desarrollo de la prueba en cuanto a la hora en que se realizó, carga de las unidades, etc.

Se anotarán los resultados de las pruebas en términos de potencia (MW), energía generada en la hora (MWh), caudal utilizado (m^3/s), nivel en el embalse (m.s.n.m), eficiencias, el percentil correspondiente a este nivel y la capacidad efectiva a la cual se realizó la prueba.

De manera general, pero especialmente en el caso de plantas cuyos instrumentos de medición de caudales han sido instalados de manera permanente en el sistema de conducción y cuentan con un documento de calibración de fábrica que certifique que el dispositivo no requiere calibraciones posteriores, el Auditor deberá realizar una evaluación de la consistencia de las mediciones del caudal medido durante las pruebas utilizando procedimientos indirectos, debidamente sustentados, basados en las mediciones de los diferentes parámetros realizadas durante las pruebas y en las características de fabricación de los equipos de generación (curvas de eficiencias de turbinas, generadores, transformadores, etc.), correspondientes a las condiciones de medición evaluadas. La documentación con la información de dichas características deberá ser incorporada como parte del soporte del reporte de la firma Auditora.

En el caso de que las evaluaciones de la consistencia de las mediciones de caudal presenten desviaciones no compatibles con la confiabilidad esperable para el sistema de medición de caudales utilizado, el Auditor notificará esta situación al agente responsable de la planta auditada, para que éste tome las medidas correctivas pertinentes para garantizar la confiabilidad del sistema de medición de caudales utilizado y se consignarán las observaciones particulares a que haya lugar.

3. Anexos

Para cumplir con los estándares del Protocolo, será obligatorio anexar los siguientes documentos:

- Diagrama unifilar simplificado indicando el punto de medición de la energía neta generada.
- La información general de cada unidad, datos tomados durante la prueba, de acuerdo con las Secciones A y B del formato de Protocolo (ver Anexo No. 8).
- Copia de los documentos del fabricante relacionados con la instalación y correcto funcionamiento de los instrumentos (donde sea aplicable).
- Datos técnicos del equipo con que se realizó la medición de caudal (marca, serial, quién operó el equipo).
- Diagrama que muestre el sistema de medición del caudal, indicando la localización del elemento de medición de flujo, así como los instrumentos asociados.
- Tabla Volumen Útil vs Factor de Conversión: corresponde a 5 niveles del embalse en la cual se registran los siguientes datos: cota, volumen útil y factor de conversión (tomado de la curva nueva). Los 5 puntos corresponderán a los volúmenes asociados al 0%, 25%, 50%, 75% y 100% del volumen útil de acuerdo con la batimetría vigente.
- Podrán anexarse los documentos que a juicio del Auditor contribuyan a dar claridad al informe.

ANEXO No. 3. MEDIDA DE CAUDAL TURBINADO POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO

1. Objetivo

Medir el caudal turbinado por máquina o planta durante la prueba.

2. Antecedentes y método de medición

Dados los diversos métodos de medidas disponibles actualmente y teniendo en cuenta la configuración física de las tuberías en las plantas, uno de los métodos confiables es el caudalímetro utilizando la línea de retardo ultrasónica diferencial.

Un pulso ultrasónico se envía por un sensor a un segundo sensor en un ángulo predefinido α respecto a la dirección del flujo. La emisión del haz se invierte y rebota luego al otro sensor. El tiempo de retardo entre los pulsos de emisión y recepción, en el sensor opuesto, permite conocer el caudal.

Se utiliza este método por la facilidad en el montaje y desmontaje de los equipos, no requiere cambiar la topología de la tubería, efectuándose la medida sin contacto, basado en el tiempo en tránsito del ultrasonido.

3. Características técnicas de los equipos de medición

Las características que deben cumplir los equipos de medición de ultrasonido son las siguientes:

- Rango de velocidad de flujo a medir desde 0.3 hasta 12.2 m/s., con una precisión del 2%.
- Capacidad para medir flujos en tuberías de ½" hasta 16 pies (12.5 mm hasta 5000 mm).
- Permitir realizar medidas de flujo en tuberías de acero y de concreto.
- Preferencialmente con transductor para establecer con precisión el espesor de la pared de la tubería.
- Poseer software para ser instalado en un PC y que permita el almacenamiento de datos y el despliegue en pantallas la visualización de los datos leídos.
- Precisión full escala +/- 2 %.
- Capacidad para corregir y eliminar errores de frecuencia y de turbulencia.
- Utilizable en agua limpia, y turbia con tubería llena.

- Facilidad para el montaje de sensores exteriormente, sin necesidad de vaciar la conducción.
- Capacidad de medir espesores de tuberías hasta de 3" (76.2 mm).

4. Alcance del montaje de los equipos y medición

El montaje del equipo y la medición se realiza de la siguiente manera:

- Se revisan las certificaciones de patronamiento de los equipos que las requieran.
- Se prepara una cinta donde se puedan sujetar y montar los sensores en la tubería.
- Se montan los sensores en la tubería de acuerdo con el ángulo entre los mismos.
- Se verificarán las distancias entre los sensores de acuerdo con el manual o las especificaciones del equipo.
- Verificar el espesor de la tubería a medir con equipo de ultrasonido para medición de espesores o con el mismo equipo si trae sensores para estos ajustes.
- Se conectan los sensores al equipo programable.
- Se programa el equipo de acuerdo con medidas internas de la tubería y el fluido.

5. Condiciones específicas que deben cumplir los equipos a utilizar

La exactitud de la medida garantizada debe ser de +/- 2 %, bajo las siguientes condiciones:

- La medida debe hacerse en un tramo rectilíneo de la tubería.
- Los tamaños de tubería, rangos de caudal y velocidad del flujo a medir, deben estar ajustados a las condiciones indicadas por el fabricante.
- No debe existir el efecto de turbulencia ocasionado por codos o cambios bruscos de dirección cercanos a la zona de los sensores.

6. Procedimiento de medición

La instalación, procesos de medición y restricciones de operación de los medidores de caudal se realizará de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Para el caso de las pruebas de FC, la utilización de caudalímetros portátiles no intrusivos se realizará por medio de abrazaderas.

ANEXO No. 4. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE INYECCIÓN DE TRAZADORES

1. Objetivo

Medir el caudal turbinado para determinar el FC.

2. Procedimiento

Una vez analizada cada unidad de una planta, se selecciona el sitio donde se mide el caudal utilizando el método de trazadores.

3. Generalidades sobre trazadores

Se define como trazador cualquier sustancia que, incorporada a la masa de un fluido, permite medir con más exactitud el paso de este a través de un conducto.

4. Trazador ideal

Para utilizar un trazador en un estudio, este debe cumplir ciertas condiciones que lo caractericen como trazador ideal, a saber:

- Su comportamiento debe ser igual al agua, es decir, el trazador y el agua deben desplazarse a la misma velocidad.
- No debe reaccionar física ni químicamente con el agua, para no interferir en su posterior detección.
- No debe ser absorbido por la conducción ni por el medio.
- No debe realizar intercambios iónicos con los materiales contenidos en el medio ni el material de las paredes de la conducción.
- Al ser adicionado no debe alterar la densidad, viscosidad y la temperatura del agua.
- Debe ser fácilmente soluble en agua.
- No debe contaminar el medio.

5. Trazadores utilizados en medición de caudales

5.1. Trazadores artificiales

Existen los siguientes tipos:

- Trazadores sólidos en suspensión.
- Trazadores químicos solubles.
- Trazadores químicos colorantes.
- Trazadores isotópicos estables.
- Trazadores isotópicos radioactivos naturales.
- Trazadores radioactivos artificiales.

5.2. Trazadores radioactivos expresamente adicionados

Los isótopos radioactivos son preparados artificialmente en reactores nucleares, esos radioisótopos se detectan en el agua a través de las radiaciones emitidas. Por las mayores ventajas que ofrecen en las técnicas de medida, suelen utilizarse, preferiblemente, los emisores de rayos gamma.

5.3. Radioisótopos utilizados

Los más importantes son los siguientes:

- Yodo-131 ($t_{1/2} = 8.05$ días).
- Bromo-82 ($t_{1/2} = 36$ horas).
- Cromo-51 ($t_{1/2} = 27.8$ días).
- Oro-198 ($t_{1/2} = 2.7$ días).
- Tritio ($t_{1/2} = 12.2$ años).

Donde $t_{1/2}$ = Período de Semidesintegración.

6. Ventajas importantes

- a. Extraordinaria sensibilidad y resolución de medida.
- b. Posibilidad de medida "in situ".
- c. Vida limitada del trazador.

7. Precisión del método

De acuerdo con la norma CEI-EIC-41 el método cumple con la precisión de +/- 2%.

8. Método de inyección instantánea

Este método consiste en inyectar un volumen (V) de solución radioactiva y con una concentración específica (C_1) en forma instantánea dentro del medio. La concentración en un punto de muestreo aguas abajo (C_2) será variable y por lo tanto función del tiempo.

Si se tiene en cuenta que la cantidad de radioisótopo inyectado es el mismo que pasa por el sitio de muestreo, se tendrá la siguiente ecuación de conservación.

$$C_i * V_i = C * dv$$

Siendo dv un elemento de volumen de la corriente. Por lo tanto, el volumen total que pasa por el punto es:

$$V = Q * t \quad \text{donde, } dv = Q * dt$$

Luego,

$$C_i * V_i = Q \int C * dt = A$$

Siendo A la actividad o cantidad de radioisótopos inyectado. Se obtiene

$$Q = \frac{A}{\int C * dt}$$

Para determinar la descarga Q es necesario conocer la cantidad de isótopo inyectado y evaluar la integral. Los datos obtenidos se llevan a una gráfica de concentración contra tiempo, y el área bajo la curva da el valor de la integral.

9. Aspectos de seguridad para el uso de trazadores radioactivos

A continuación, se describen las consideraciones básicas de seguridad radiológica y se detalla la planeación cumplida en la ejecución de los trabajos referente a seguridad en los procesos de operación, tales como transporte de material radioactivo al sitio, inyección del radiotrazador, detección y protección de la población en general y el medio ambiente.

10. Consideraciones básicas de seguridad radiológica

El objetivo de la protección a la radiación es limitar el tiempo de exposición, de modo que los efectos nocivos causados a los individuos, sociedad y medio ambiente sean tan pequeños como sea posible.

Los principios de protección de la radiación están contenidos en las recomendaciones del ICRP (International Comisión of Radiological Protection), en lo concerniente a las dosis máximas permisibles.

Toda exposición se debe mantener de acuerdo con los parámetros recomendados, el trazador debe cumplir los requisitos de baja radiotoxicidad, vida media corta, actividad máxima permisible y utilizar instrumentos adecuados en medida de radiación.

Como se ha mencionado, los radiotrazadores utilizados en aplicaciones en hidrología y estudios ambientales, son de vida media corta, y una vez se dispersa en el ambiente, la concentración decrece en varios órdenes de magnitud.

10.1. Seguridad de los trabajadores expuestos.

Deben prepararse en el manejo, transporte, inyección, recolección de muestras en campo y demás aspectos técnicos relacionados con el manejo del trazador seleccionado.

10.2. Seguridad de la población

Está basada en un adecuado control de las cantidades de radiación transferidas al ambiente evitando que sean superiores al máximo permisible por año y consecuentemente protegiendo a la población potencialmente expuesta.

10.3. Seguridad en el transporte del material radioactivo

El empaque usado para el transporte del material radioactivo debe cumplir con las normas de regulación, se transporta en castillos de plomo debidamente marcados y rotulados de acuerdo con las normas de protección.

ANEXO No. 5. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE AFORO HIDROMÉTRICO

Este anexo presenta una breve descripción del procedimiento de medición de caudales, utilizando el método del aforo hidrométrico.

Este método, que se utiliza para aforos en corrientes con flujo a superficie libre, no obstante tener en promedio errores que pueden variar del 5% al 10% del valor real, es recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y es el de más amplia difusión entre los servicios hidrometeorológicos de todos los países. Este método se conoce también como método de área - velocidad, dado que se basa en la siguiente ecuación:

$$Q = v * A$$

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 .

Para una mejor comprensión, la Figura 1 muestra la distribución volumétrica del flujo que pasa por una sección en cada unidad de tiempo.

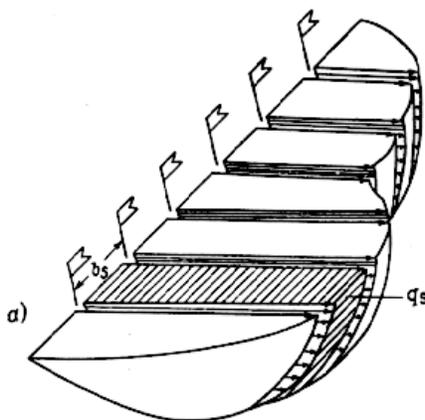


Figura 1. Modelo área - velocidad

Nótese que la dinámica del flujo no es homogénea. Esto se debe a que el campo dinámico (velocidad) varía con la profundidad y a medida que el flujo se aleja de las riberas.

El método de área – velocidad subdivide el flujo en diferentes secciones individuales, que llamaremos s , (véanse recomendaciones generales al final de este anexo), cada una de las cuales tiene un caudal parcial, que se calcula utilizando de manera análoga la fórmula (1), así:

$$q_s = v_s a_s \quad (2)$$

Donde: q_s caudal de la sección s .

v_s velocidad media en la sección s .

a_s área de la sección s .

El caudal total (Q) es pues, la suma de los caudales parciales.

$$Q = \sum_{s=1}^n q_s \quad (3)$$

En la fórmula (2), cada sección parcial de ancho b_s , se halla delimitada por dos verticales de velocidad (i e $i+1$), siendo la velocidad media de una sección cualquiera, el promedio de las velocidades de dos verticales vecinas, así:

$$v_s = \frac{1}{2}(v_i + v_{i+1}) \quad (4)$$

Para obtener una mayor aproximación en la determinación de la velocidad en una vertical, es importante medir dicho parámetro en puntos localizados de la sección transversal, donde la velocidad promedio ocurra con mayor probabilidad. Estas velocidades serán multiplicadas por el peso asignado a cada profundidad de medición, obteniéndose de esta manera la velocidad en una vertical dada de la sección.

Generalmente, en un canal la velocidad máxima ocurre entre 0.05 y 0.25 del tirante (profundidad) por debajo de la superficie del agua, y la velocidad mínima se desplaza en el sitio de contacto del flujo con la superficie rugosa del lecho. La velocidad media se localiza aproximadamente a 0.60 del tirante. Sin embargo, la naturaleza misma del lecho puede hacer que la velocidad media se desplace desde esta profundidad hacia otra, difícil de identificar.

El procedimiento recomendado en este anexo es el del aforo detallado, el cual considera que la medición de velocidad se deberá hacer a cinco (5) diferentes profundidades.

Aforo detallado:

Se realiza cuando se mide la velocidad del flujo en cinco (5) diferentes profundidades, para cada vertical de medición.

La velocidad media en una vertical se calcula utilizando la fórmula recomendada por la OMM, como sigue:

$$\bar{v} = 0.1(v_{\text{sup}} + 3v_{0.2h} + 3v_{0.6h} + 2v_{0.8h} + v_{\text{fondo}}) \quad (5)$$

Donde los subíndices *sup*, *0.2h*, *0.6h*, *0.8h* y *fondo* denotan las velocidades medidas a nivel superficial, al 20%, 60%, 80% de la profundidad y en el fondo de la sección.

Si no es posible estimar la velocidad en las orillas, dicha velocidad se calcula utilizando la velocidad de la vertical más cercana a cada ribera, multiplicándola por un factor (*k*) obtenido de la siguiente tabla:

Condición de la ribera	K
Pendiente suave con profundidad 0 en la ribera	0.7
Ribera natural e irregular	0.8
Ribera revestida de un material uniforme	0.9
Presencia de espacios muertos	0.5

Si por algún motivo es imposible medir la velocidad en una vertical en cinco puntos, se acepta que dicha medición sea en tres puntos, utilizando la siguiente fórmula:

$$\bar{v} = 0.25(v_{0.2h} + 2v_{0.6h} + v_{0.8h}) \quad (6)$$

Recomendaciones:

La OMM recomienda para la selección del sitio de medición lo siguiente:

- La sección debe ser recta y uniforme aguas arriba del sitio de medición, en una distancia de al menos cinco (5) veces el ancho total de la misma.
- El lecho de la sección debe ser suave, libre de vegetación, rocas u otras obstrucciones.
- El lecho y las bancas de la sección deben ser firmes y estables.
- La dirección del flujo debe ser normal a la sección de medición.
- Las velocidades deben ser mayores a 0.15 m/s y menores de 2.5 m/s.

Se debe tratar de que no pase más del 10% del caudal total, a través de alguna sección parcial. Por ello, es aconsejable dividir la sección de aforos en al menos 11 secciones parciales.

El instrumento utilizado para la medición de la velocidad es el correntómetro, micromolinete o caudalímetro. Por regla general cada instrumento tiene asociada una tabla de calibración única, que relaciona la frecuencia de giro de sus hélices por unidad de tiempo, con la velocidad de la corriente.

A este respecto se recomienda que el equipo que haga el aforo por el método de área - velocidad, conozca de antemano los instrumentos de medición.

Finalmente, en caso de utilizar el correntómetro mecánico para la medición de la velocidad, se recomienda que cada medición tenga al menos una duración de 45 segundos.

ANEXO No. 6. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES, UTILIZANDO EL MÉTODO DE DIFERENCIA DE PRESIONES

1. Introducción

En el presente Anexo se describen los Métodos de medición de caudales que son utilizados en centrales Hidroeléctricas como son el Tubo Pitot y el Tubo Prandtl. Con estos métodos se pueden medir caudales en conductos cerrados antes de turbinar con una precisión hasta de $\pm 2\%$, de acuerdo con la tabla AI de la norma CEI IEC-41 "Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump – turbines". 1991-11.

2. Método de medición de caudal por medio del tubo pitot en conductos cerrados de centrales hidroeléctricas.

Este método fue ideado por Pitot para medir la presión total, llamada también presión de estancamiento (suma de la presión estática y de la presión dinámica). En la Figura 1, se pueden ver las líneas de corriente.

Al encontrarse el flujo al inicio del tubo punto 1 con la corriente, forma un punto de estancamiento o de remanso. La velocidad en ese punto se reduce a cero y la presión, se aumenta hasta el valor obtenido en la siguiente fórmula:

$$P_1/\gamma = P_t/\gamma = P_0/\gamma + V_0^2/2g$$

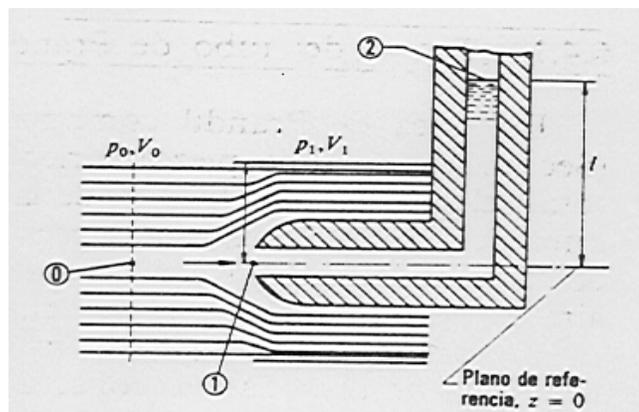


Figura 1

Donde:

P_t Presión total o de estancamiento o de remanso

P_0 Presión de la corriente antes de la perturbación

V_0 Velocidad de la corriente antes de la perturbación (teóricamente en el infinito)

G Aceleración de gravedad

$\gamma = \rho \cdot g$ Peso específico, que se define como el peso por unidad de volumen

Suponemos por sencillez, que los puntos 0 y 1 se encuentran en el mismo plano horizontal, despreciando así las pérdidas.

Aplicando la ecuación anterior entre las secciones 1 y 2 tendremos:

$$P_t / \gamma + V_1^2 / 2g + Z_1 = P_2 / \gamma + V_2^2 / 2g + Z_2$$

Pero en 1 y 2 se presentan condiciones estáticas, es decir, $V_1 = V_2 = 0$ y $Z_2 = L$

Luego

$$P_t = \gamma L = \rho g L$$

Esta fórmula expresa la presión de estancamiento en el tubo Pitot.

Donde:

$$P_t = P_0 + \rho V_0^2 / 2g$$

y

$$V_0 = \sqrt{(P_t - P_0) \cdot 2g / \rho}$$

Conociendo la velocidad del flujo y teniendo el área interna (A) de la conducción cerrada o tubería tenemos que

$$A = \pi D^2 / 4$$

Por consiguiente, el caudal en la sección medida es:

$$Q_0 = V_0 \cdot A = \pi D^2 / 4 \cdot V_0$$

$$Q_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{(P_t - P_0) \cdot 2g / \rho}$$

La última fórmula permite calcular el caudal que pasa por una tubería de una central hidroeléctrica a través del método del Tubo Pitot.

3. Método de medición de caudal por medio del tubo de Prandtl en conductos cerrados en centrales hidroeléctricas.

Fue idea de Prandtl la de combinar en un solo instrumento el Tubo Pitot y un tubo Piezométrico. El tubo Pitot mide la presión total, en tanto que el tubo Piezométrico mide la presión estática, y el tubo de Prandtl mide la diferencia de las dos, que es la presión dinámica. Es muy usado frecuentemente en los laboratorios con líquidos y gases para medir la velocidad y el caudal.

En la Figura-2 se muestra un tubo Prandtl introducido en un fluido de densidad ρ , conectado a un manómetro diferencial, cuyo líquido manométrico tiene una densidad ρ_m

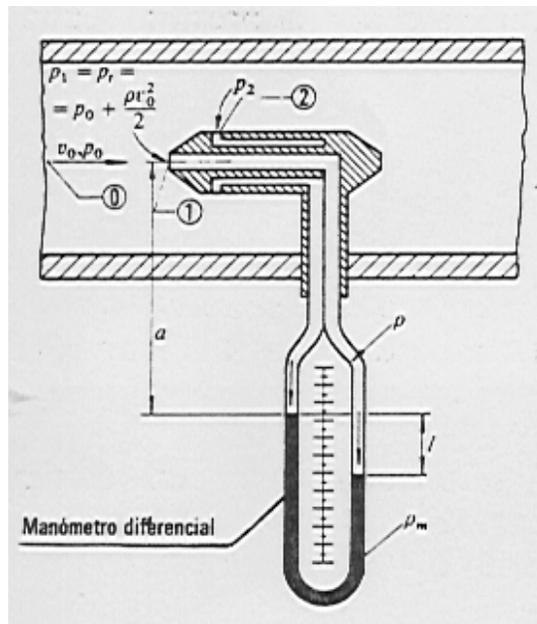


Figura 2

El tubo Prandtl, al ser introducido en el fluido produce una perturbación, que se traduce en la formación de un punto de estancamiento, de tal forma que:

$$P_1 = P_t$$

$$V_1 = 0$$

En el punto 0 de la corriente no perturbada tiene la presión P_0 y la velocidad V_0 , que es la velocidad a medir.

El punto 1 se elige a la entrada del tubo Pitot, en tanto que en el punto 2 (véase Figura 2) se tiene en realidad un tubo piezométrico con diversas entradas laterales que no perturban la corriente y que miden por lo tanto la presión estática.

Despreciando en primera aproximación las diferencias de alturas de velocidad y geodésicas entre los puntos 0 y 2 que suelen ser muy pequeñas por ser el tubo muy fino y estar en la corriente en 2 prácticamente normalizada después de la perturbación en 1, se tendrá, despreciando también las pérdidas:

$$V_2 = V_{0t}$$

$$P_2 = P_0$$

Donde: V_{0t} : Velocidad teórica en la sección 0.

Si aplicamos la ecuación de Bernoulli entre 0 y 1 ($Z_0 = Z_1$, $V_1 = 0$, Punto de estancamiento).

$$P_0 + \rho V_{0t}^2 = P_1$$

$$P_1 - P_2 = \rho V_{0t}^2/2$$

Aplicando la ecuación fundamental de la hidrostática entre los puntos 1 y 2 ($Z_1 \cong Z_2$)

$$P_1 = P_2 + \rho g a + \rho_m g L - \rho g L - \rho g a$$

Finalmente se tiene que:

$$\rho V_{0t}^2/2 = (\rho_m - \rho) g L$$

que es la presión dinámica teórica del tubo de Prandtl.

Despejando, tenemos:

$$V_{0t} = \sqrt{2g \cdot (\rho_m - \rho) \cdot L / \rho}$$

Para aplicar la ecuación de velocidad en medición de caudales de agua tenemos:

$$V_{0t} = \sqrt{2g \cdot (\delta - 1) \cdot L}$$

Donde δ es la densidad relativa del líquido manométrico.

En la práctica V_2 es algo mayor que V_0 , por lo tanto, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli P_2 es inferior a P_0 . Por consiguiente, la velocidad a medir (que es la real V_0) es la siguiente:

$$V_0 = C_v \sqrt{2g \cdot (\rho_m - \rho) \cdot L / \rho}$$

Esta es finalmente la velocidad real de la corriente de agua en el tubo Prandtl.

Donde C_v es el coeficiente de velocidad del Tubo Prandtl, que oscila entre 0.01 y 1,03 y que se determina experimentalmente. Sin embargo, si el tubo se orienta paralelamente a las líneas de la corriente y con una inclinación inferior a 10° , puede hacerse aproximadamente $C_v = 1$.

Conociendo la velocidad y teniendo el área interna de la conducción del agua hacia las turbinas tenemos:

$$A = \pi D^2/4$$

$$Q_0 = \pi D^2/4 * V_0$$

Q_0 es el caudal medido hacia la turbina o turbinas.

Las dimensiones de los tubos Prandtl están normalizadas y en la Figura 3 se muestran las relaciones dimensionales que se deben observar.

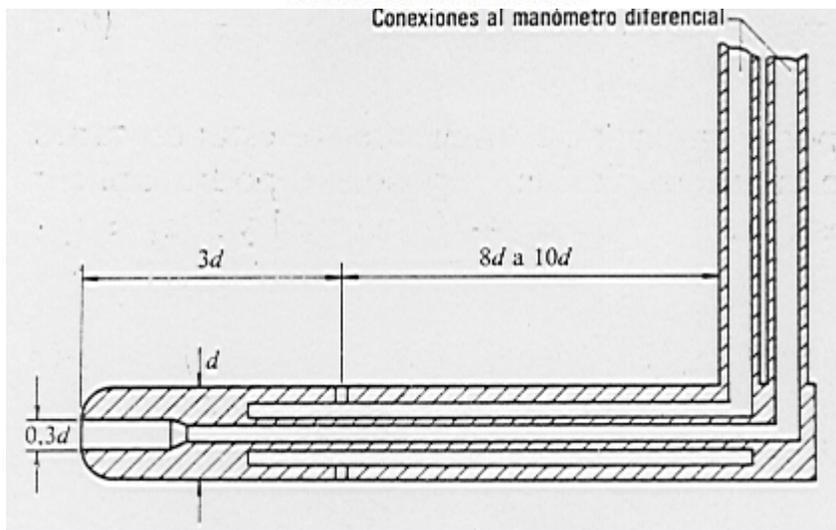


Figura 3

NOTA: Dado, que en la práctica ingenieril existen diversas variantes al método general de medición por diferencia de presiones, expuesto en este anexo, el Auditor para avalar este método, deberá conocer de antemano las características particulares de los instrumentos utilizados para la estimación del caudal en aquellas centrales que utilicen este sistema.

ANEXO No. 7. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO Y EL CÁLCULO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO MEDIANO

El procedimiento general es el siguiente:

1. La firma auditora seleccionada por el agente, de la lista prevista en el Acuerdo correspondiente (ver Acuerdo 975 del 2017 o aquellos que lo modifiquen o sustituyan), auditará las pruebas y calculará el FC para cada nivel seleccionado.
2. A partir de los valores de FC medidos para cada nivel, calculados como se indicó en el numeral 5 del presente Protocolo, el Auditor utilizará el método de ajuste, físicamente factible, aplicable al grupo de valores obtenidos, para construir la relación entre el FC y su nivel asociado, o función del Factor de Conversión⁵.

Para la construcción de esta relación se podrán tomar, además de los puntos asociados a los cuatro percentiles característicos definidos en este Protocolo, otros puntos de pruebas auditadas realizadas en niveles del embalse diferentes.

3. El Auditor extrapolará la función obtenida en el numeral 2, de tal forma que cubra el rango entre el NMT y NMF.
4. Con la función del FC obtenida, se estima el FC_m para el nivel asociado al percentil 50.
5. Las Plantas Filo de agua estimarán su FC con una sola prueba, tal como se menciona en el numeral 8 del presente Protocolo.

Una vez determinada la función del FC siguiendo los lineamientos estipulados en el presente Protocolo, la misma tendrá la vigencia definida en el numeral 5 de este Protocolo.

⁵ El comportamiento teórico de la potencia, el caudal turbinado y las pérdidas de energía hidráulica (en el sistema de conducción y en los dispositivos de regulación de caudales de las turbinas), permite conceptualizar la relación entre el FC y el nivel del embalse (función del Factor de Conversión) mediante una expresión de tipo polinómico, acotada inferiormente por el NMT del embalse. De esta forma, la función del FC es una función continua, monótonamente creciente, modulada por el tipo de prueba realizada, ya sea con potencia constante o variable para todos los niveles del embalse (apertura variable o constante del sistema de regulación del caudal turbinado, respectivamente).

**ANEXO No. 8. FORMATOS PARA LA TOMA DE DATOS EN EL SITIO Y
CÁLCULO PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS**

							FORMATO 1 DE 2
PROTOCOLO DE PRUEBA							
FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO							
PLANTAS HIDRÁULICAS							
A. INFORMACIÓN GENERAL							
Planta			# Unidades		Fecha de la prueba		
Agente			Localización				
Tipo de Turbina		Modelo		Fabricante		Inicio Operación Comercial	
Pelton							
Francis							
Otra							
CAPACIDAD (MW)		Bruta			Neta		
Nominal							
Efectiva actual							
Horas de operación							
Unidad		Totales			Desde último mantenimiento mayor		
GENERADOR		Fabricante		Capacidad (kVA)		Voltaje (kV)	Cos ϕ
B. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN							
EQUIPO		Marca	Tipo	No. de serie	Precisión	Clase	Fecha última calibración
Contador No. 1							
Contador No. 2							
Contador No. 3							
							FORMATO 2 DE 2

PROTOCOLO DE PRUEBA					
FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO					
PLANTAS HIDRÁULICAS					
A. INFORMACIÓN GENERAL					
Planta		# Unidades		Fecha de la prueba	
B. DATOS TOMADOS DURANTE LA PRUEBA					
1. VALORES INSTANTÁNEOS					
Tiempo	Potencia (MW)	Percentil del Nivel	Nivel del Embalse (m.s.n.m)	Nivel de la descarga (m.s.n.m)	Caudal (m ³ /s)
Promedio					
2. VALORES ACUMULADOS					
Hora	Lectura	Contador No. 1 (kWh)	Contador No. 2 (kWh)	Contador No. 3 (kWh)	
	Inicial				
	Final				
	Diferencia				
3. RESULTADOS DE LA PRUEBA					
ENERGIA NETA GENERADA		MWh			
CAUDAL PROMEDIO		m ³ /s			
FACTOR DE CONVERSIÓN		MW/m ³ /s			