

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN

CNO

ACUERDO N° 360 Mayo 25 de 2006

Por el cual se sustituye el Acuerdo N° 308 del CNO, del 29 de octubre de 2004.

El Consejo Nacional de Operación en uso de sus facultades legales, en especial las conferidas en el Artículo 36 de la Ley 143 de 1994, la Resolución 8-0103 del 2 de febrero de 1995 del Ministerio de Minas y Energía, el Anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995 y según lo decidido en la reunión No. 235 del 25 de mayo de 2006, y

CONSIDERANDO:

1. Que el Subcomité Hidrológico y de Plantas Hidráulicas en sus reuniones ordinarias 145 a 152 revisó detenidamente el protocolo vigente para la estimación del factor de conversión de plantas hidráulicas y consideró necesario efectuar algunos ajustes que permitiesen clarificar la interpretación de sus procedimientos.
2. Que el Comité de Operación en su reunión 128 del 18 de mayo de 2006 recomendó al CNO, mediante concepto CO-65, aprobar la solicitud del Subcomité Hidrológico y de Plantas Hidráulicas de expedir un acuerdo que sustituya el Acuerdo 308 del CNO.

ACUERDA:

PRIMERO.- Aprobar el documento denominado "PROTOCOLO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE PLANTAS HIDRÁULICAS" con sus anexos.

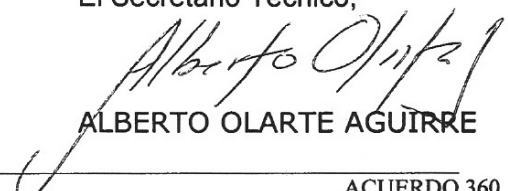
SEGUNDO.- El presente acuerdo sustituye el Acuerdo No. 308 y deroga todas las normas que le sean contrarias.

TERCERO.- El presente Acuerdo rige a partir de la fecha de su expedición.

El Presidente,


RAFAEL PEREZ CARDONA

El Secretario Técnico,


ALBERTO OLARTE AGUIRRE

ACUERDO 360

CONSEJO NACIONAL DE OPERACIÓN CNO

PROTOCOLO PARA LA ESTIMACION DEL FACTOR DE CONVERSION DE PLANTAS HIDRAULICAS

1. 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:

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.

Potencia Eléctrica (N): es aquella potencia producida al paso del agua por la turbina de una planta de generación y se calcula como:

$$N = 9.81 \eta_{Turbina} \eta_{Gener.} \eta_{Transf} \eta_H QH = K_N QH \quad (1)$$

Donde

- N Potencia Eléctrica, en kW.
- Q Caudal (m^3/s), que se entiende como el volumen de agua que pasa por una sección definida en la unidad de tiempo.
- H Cabeza hidráulica bruta (m), definida como la diferencia de elevación entre el nivel de la superficie libre del agua en el embalse y el eje de la turbina, si es una turbina Pelton, y con respecto al nivel estático de la descarga si es una turbina Francis.
- $\eta_{Turbina}$ Eficiencia de las turbinas
- $\eta_{Gener.}$ Eficiencia del Generador
- $\eta_{Transf.}$ Eficiencia del transformador
- η_H Eficiencia de la conducción
- K_N Coeficiente de potencia

Consejo Nacional de Operación

CNO

Factor de Conversión Hidráulico (Fc): es la 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/(m³/s), se calcula como sigue:

$$FC = N / (1000 Q) = K_N H / 1000 \quad (2)$$

Curva del Factor de Conversión Hidráulico en Función del Nivel del Embalse: Debido a que el factor de conversión (Fc) varía con el nivel del embalse, es necesario definir una relación funcional entre dicho factor y el nivel del embalse. Para efectos de este protocolo, esta relación se obtiene a través de la medición del factor de conversión para diferentes niveles del embalse. El procedimiento a seguir está descrito en el numeral 5 del presente protocolo.

Factor de Conversión Hidráulico mediano de una Planta Hidráulica (Fc_m): Es el factor de conversión más representativo de la planta, que será utilizado en los casos en que 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 cinco años.

Nivel Máximo Físico. Elevación máxima de la superficie del agua del embalse, expresada en msnm, definida por la cota de la cresta del vertedero, o la cota superior de compuertas, o debajo de ésta, si existe alguna restricción en la estructura hidráulica.

Caída Bruta. En plantas hidroeléctricas que tengan como equipamiento turbinas Pelton, es la diferencia entre el Nivel Máximo Físico y la cota de eje de las turbinas. En plantas hidroeléctricas que tengan turbinas Francis, será la comprendida entre el Nivel Máximo Físico y el Nivel Estático de la Descarga.

Consejo Nacional de Operación CNO

Centrales Filo de agua: Para el presente protocolo se considera que toda planta que cumpla cualquiera de las siguientes dos condiciones es filo de agua:

a) 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.

b) Que la central posea embalse cuyo tiempo de vaciado, generando con su capacidad efectiva bruta, considerando el aporte promedio multianual e iniciando con embalse lleno, sea menor o igual a un (1) día, o si el tiempo de llenado generando con dicha capacidad efectiva bruta y con el aporte promedio multianual iniciando con embalse vacío, sea menor o igual a un (1) día.

2. OBJETIVO DE ESTE PROTOCOLO

Establecer el alcance, procedimiento y periodicidad de las pruebas de los factores de conversión de las plantas hidráulicas del Sistema Interconectado Nacional, e igualmente, el proceso para la determinación del factor de conversión hidráulico mediano. El alcance de este Protocolo no incluye la verificación de la Capacidad Efectiva Neta, la cual es objeto de otro procedimiento

3. AMBITO DE APLICACIÓN

Se aplica a todos los agentes que poseen plantas de generación hidráulica despachadas centralmente, incluyendo las centrales que operan a filo de agua.

4. ALCANCE DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se realizarán individualmente para cada una de las unidades de una planta. Para obtener el factor de conversión hidráulico de la planta, se promediarán aritméticamente los factores de conversión de las unidades.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Como resultado de estas pruebas se obtendrá la función del factor de conversión de una planta hidráulica en relación con el nivel del embalse asociado. El Factor de Conversión Hidráulico mediano será calculado a partir de esta función. Tanto la función como el factor de conversión mediano serán utilizadas para todos los efectos operativos y comerciales.

En aquellas plantas en las cuales la medición de caudal no se pueda hacer de manera individual para cada unidad se recomienda realizar la prueba a un grupo de unidades y medir el caudal en la conducción común a ellas. El Factor de Conversión se calcula como la relación entre la suma de las potencias del grupo de unidades y el caudal total medido en la conducción.

El agente, de acuerdo con las particularidades de la central, tendrá libertad de realizar las pruebas a cada unidad individualmente, o a toda la planta en conjunto. En aquellas plantas en las que se puedan efectuar las pruebas de varias unidades simultáneamente, pero con datos individuales por unidad, será opción del generador programarlas y ejecutarlas cumpliendo con los requisitos de los valores instantáneos y los valores acumulados que trata el anexo No. 2 y el anexo No. 8 del presente protocolo.

De igual manera, podrá utilizar un método único para la medición del caudal que pasa a través de la tubería de carga, o hacer la combinación que considere más adecuada de los métodos de medición que se presentan en los anexos Nos. 3, 4, 5 o 6.

En caso de que durante las pruebas objeto de este protocolo, alguna unidad se halle en mantenimiento debidamente soportado ante el CND, el factor de conversión para esta unidad será el menor valor del obtenido para las restantes unidades asignándole la misma cota obtenida durante las mediciones a aquella unidad.

5. PROCEDIMIENTO GENERAL

Consejo Nacional de Operación

CNO

5.1 PRUEBAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRAULICO vs. COTA

En primer lugar se requiere la selección de niveles de embalse en los cuales se hará la medición de la potencia generada por la planta. Cada agente seleccionará de acuerdo con sus condiciones de caída de su central, una de las siguientes variantes:

Variante 1:

- a. Cada empresa, usando la información disponible de los niveles diarios de los embalses (cotas en metros sobre el nivel del mar) para los últimos cinco (5) años calendario que finalizan en el mes de diciembre del año inmediatamente anterior a aquel en el que se hacen las mediciones, y utilizando el procedimiento descrito en el Anexo No. 1 del presente documento, calculará para cada embalse los cuatro niveles para los cuales se hará la prueba del Factor de Conversión.
- b. La prueba del Factor de Conversión se realizará en el sitio para los cuatro niveles obtenidos en el literal anterior, utilizando el procedimiento descrito en el Anexo No. 2. Los formatos para la toma de datos en el sitio y cálculo para cada una de las pruebas, se muestran en el Anexo N° 8 de este protocolo.
- c. Estimación de la función del Factor de Conversión Hidráulico en relación con el nivel en el embalse para cada Planta Hidráulica, usando el procedimiento descrito en el Anexo No. 7 del presente Protocolo.
- d. Cálculo del Factor de Conversión Hidráulico mediano utilizando la metodología descrita en el Anexo No. 7 del presente Protocolo.

Variante 2:

Consejo Nacional de Operación CNO

- a. Cada empresa usando la información disponible de los niveles diarios de los embalses (cotas en metros sobre el nivel del mar) para los últimos cinco (5) años calendario que finalizan en el mes de diciembre del año inmediatamente anterior, y utilizando el procedimiento descrito en el Anexo No. 1 del presente documento, calculará para cada embalse los cuatro niveles para los cuales se hará la prueba del Factor de Conversión.
- b. Para llevar a cabo las mediciones cada agente tendrá una banda de tolerancia (BT) en los niveles, equivalente al cinco por mil de la caída bruta de la central. Esta banda se desplazará verticalmente a lo largo del rango de variación histórica de niveles (últimos cinco años). En caso de que en algún momento esta BT abarque los niveles de dos o más percentiles contiguos determinados en el punto anterior, se podrá hacer la prueba en cualquier nivel de embalse dentro de esta banda y esta medición reemplazará las mediciones de los percentiles cubiertos dentro de la banda. Sin embargo, en la gráfica que elaborará el auditor, el punto se dibujará de acuerdo con los valores medidos de factor de conversión y nivel del embalse durante la prueba.
- c. Estimación de la función del Factor de Conversión Hidráulico en relación con el nivel en el embalse para cada Planta Hidráulica, usando el procedimiento descrito en el Anexo No. 7 del presente Protocolo.
- d. Cálculo del Factor de Conversión Hidráulico mediano utilizando la metodología descrita en el Anexo No. 7 del presente Protocolo.

Las pruebas y la curva obtenida en cualquiera de sus dos variantes tendrán una vigencia máxima de cinco años. Este período de cinco (5) años se contará a partir del mes siguiente a aquel en que se realizó la última medición con base en la cual se estableció la curva definitiva "Cota vs. Factor de Conversión" o a partir de la homologación de que tratan los acuerdos 198 y 247 del Consejo Nacional de Operación, lo que sea más tarde.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Es potestativo del agente durante este período, hacer nuevas mediciones para todas las unidades y establecer una nueva curva "Cota vs. Factor de Conversión", caso en el cual el período de cinco (5) años volverá a iniciar.

5.2 APLICACIÓN DE LA FUNCIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN vs. COTA DURANTE EL TIEMPO DE SU VIGENCIA

Durante el período de vigencia de los cinco (5) años mencionados en el numeral anterior, cada planta que deba reportar el Factor de Conversión Mediano tendrá en cuenta el siguiente procedimiento:

- a) Determinar la serie histórica de niveles diarios de los últimos cinco (5) años, con corte al 31 de diciembre del año anterior al cual reportará el nuevo factor de conversión mediano.
- b) Determinar la cota, expresada en msnm, asociada al percentil 50 de la serie histórica indicada en el literal a.
- c) Con el valor de la cota asociada al percentil 50, entrar a la curva vigente y determinar el factor de conversión mediano correspondiente a dicha cota.

6. AUDITOR

Las pruebas deberán ser auditadas por una firma nacional o extranjera. El Consejo Nacional de Operación -CNO-, será la entidad encargada de preseleccionar las firmas auditoras.

El auditor deberá preparar un informe de la prueba en la que de fe de los procedimientos realizados, de las medidas tomadas y de los resultados obtenidos para el Factor de Conversión.

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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.

7 PLANTAS HIDRÁULICAS NUEVAS, O QUE SE ENCUENTREN EN PROCESO DE REINCORPORACIÓN AL MERCADO MAYORISTA.

Se entiende por plantas hidráulicas nuevas aquellas que habiendo entrado en operación comercial por primera vez, tienen un período de operación menor o igual a 3 años.

El procedimiento de cálculo que se detallará mas adelante tiene en cuenta la información histórica diaria de embalses, diferentes a los asociado a plantas filo de agua, y que a su vez posean información histórica por lo menos de cinco años con corte al 31 de diciembre del año inmediatamente anterior al cual se determinará el factor de conversión de la planta considerada como nueva.

Los embalses que tienen las características antes anotadas los determinará el CNO, para lo cual, el Secretario Técnico del CNO enviará carta a los agentes dueños de dichas plantas para que dentro de un plazo establecido envíen la siguiente información al CNO: Nivel Mínimo Técnico, Nivel Máximo Físico, y cota asociada al percentil 50 de su serie histórica quinquenal con corte al 31 de diciembre del año inmediatamente anterior a aquel para el cual se desea determinar el factor de conversión de la planta nueva. La cota asociada al percentil 50 la calculará cada agente como dueño de su planta y de su correspondiente información histórica.

Vencido el plazo establecido por el CNO para el envío de la información, el agente interesado en determinar el factor de conversión de su planta nueva hará el cálculo con la información que hasta ese momento le haya enviado el Secretario Técnico del CNO.

7.1. Para las plantas nuevas se utilizará el siguiente procedimiento:

Consejo Nacional de Operación CNO

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

$$\text{Porcentaje Nivel Percentil 50} = (\text{Cota percentil 50} - \text{Nivel Mínimo Técnico}) / (\text{Nivel Máximo Físico} - \text{Nivel Mínimo Técnico}).$$

- b. Se tabulan las relaciones anteriores para todos los embalses en operación y se obtiene el promedio aritmético.

Este porcentaje encontrado se usa para calcular el percentil 50 de la nueva central. Debe interpretarse como el porcentaje de la diferencia entre el Nivel Máximo Físico y el Nivel Mínimo Técnico, para el embalse asociado a la nueva central.

- c. La nueva central teniendo el porcentaje y la diferencia de niveles calcula el nivel del percentil 50 así:

$$\text{Cota asociada al Percentil 50 (msnm)} = \text{Nivel Mínimo Técnico en msnm} + \text{Porcentaje Nivel Percentil 50} * (\text{Nivel Máximo Físico en msnm} - \text{Nivel Mínimo Técnico en msnm})$$

- d. Con la cota asociada al percentil 50 (msnm) entrará a la curva teórica de la planta considerada como nueva y encontrará el factor de conversión hidráulico ($\text{MW}/\text{m}^3/\text{s}$).

En el caso de centrales nuevas que la CREG haya conceptuado como multipropósito, el procedimiento será diferente: 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 factor de conversión correspondiente en la curva teórica elaborada con base en el diseño. Este será el factor de conversión mediano.

Con base en la metodología anterior, las centrales nuevas reportarán este valor aplicando anualmente el procedimiento antes enunciado.

Consejo Nacional de Operación

CNO

Esto se repetirá hasta el momento en el que se hagan las pruebas de medición del factor de conversión durante la etapa de operación.

Considerando el año de entrada en operación comercial de toda la planta el año T, las pruebas deberán realizarse durante el año (T+3), con los percentiles calculados con base en la serie de niveles conformada desde la fecha de entrada en operación comercial de toda la central en el año T, hasta el 31 de diciembre del año (T+2).

La curva Factor de Conversión vs nivel de embalse realizada con las pruebas del año T+3, servirá para calcular el Factor de conversión mediano tal como se ha definido en el numeral 1 de este protocolo. Esta curva tendrá una validez de 5 años y el Factor de conversión mediano se calculará cada año, aplicando a la función característica Cota vs. Factor de Conversión, la cota asociada al percentil 50 con corte al 31 de diciembre del año inmediatamente anterior al cual se determina el factor de conversión hidráulico. Cuando se tengan más de 5 años de datos diarios de niveles, se utilizará el procedimiento descrito en el numeral 5 de este protocolo.

7.2. Para unidades que hayan sido reincorporadas al 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 Factor de Conversión de las demás unidades de la planta que permanecieron conectadas al SIN.

Las mediciones del Factor de Conversión 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.

Consejo Nacional de Operación CNO

8. 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 y en aquellas que la sustituyan o modifiquen.

9. CENTRALES FILO DE AGUA

Las centrales filo de agua tal como están definidas en este protocolo estimarán su factor de conversión con una sola prueba. Dicho factor de conversión medido tendrá una vigencia de 5 años contados a partir de la ejecución de la prueba ó de la homologación. Para ejecutar la prueba no se exigirá un nivel específico de agua en las estructuras de captación y/o conducción.

10. CASOS ESPECIALES

Cuando por causas que hayan sido previamente justificadas al Consejo Nacional de Operación, no haya sido posible realizar una o más de las pruebas del Factor de Conversión programadas, los valores medidos se unirán mediante líneas rectas. Para determinar el resto de la curva para aquellos niveles no cubiertos por las líneas rectas, se extrapolará siguiendo la misma tendencia de la curva teórica o de la última curva elaborada con base en otras pruebas.

En el evento que una empresa prevea que por razones fuera de su control, no pudiese realizar las pruebas en el periodo de un año luego de vencida la vigencia de la curva disponible, deberá informar por escrito al Secretario Técnico del CNO, con una antelación de 30 días calendario a la finalización del plazo, las razones por las cuales no pudo completar la realización de las pruebas, pero en todo caso, a más tardar quince (15) días antes de la fecha límite establecida por la CREG para la entrega de la información de Cargo por Capacidad.

El CNO podrá ampliar por una vez el plazo para la realización de las pruebas hasta por un año, utilizando los mismos niveles para los cuales no se pudo realizar la prueba.

Consejo Nacional de Operación CNO

11. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE MEDICIÓN.

Previo a la realización de las pruebas y de acuerdo con los requisitos técnicos, usualmente aceptados, del método escogido por cada empresa para la medición del factor de conversión de su planta o unidades de generación, los equipos requeridos de la prueba deben ser debidamente certificados y calibrados por el fabricante del mismo o un representante en el país debidamente acreditado. En caso de que lo anterior no sea posible, los equipos podrán ser calibrados por una entidad que certifique esta actividad.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO No. 1

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS CUATRO NIVELES (COTAS) DE EMBALSE A 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 cinco 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 cinco (5) años calendario, que termina el 31 de diciembre del año inmediatamente anterior al cual se hace el respectivo cálculo.

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 100k-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 por ciento 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:

- 1) Calcular la posición i del percentil k mediante el producto de n por k . Si nk no es un entero, entonces i es el siguiente entero más grande. Si nk es entero, i es igual a $nk + 0.5$;
- 2) P_k (nivel del embalse que corresponde al percentil k) será:

Consejo Nacional de Operación CNO

- 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 nk y $(nk + 1)$.

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 cinco años calendarios continuos.

Nota: Si el nivel del embalse asociado a algún percentil (calculado de acuerdo con lo enunciado en este anexo) es superior al Nivel Máximo Físico definido en la resolución CREG No. 059/99, se podrá considerar que el valor de dicho percentil estará asociado al Nivel Máximo Físico, tomando esta cota como base para la determinación de las tolerancias de medición.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO No. 2

PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO

1. DOCUMENTOS DE LA PRUEBA

Para la realización de la misma se requiere la información básica referente a la prueba, la información general sobre la planta, las mediciones realizadas. Los resultados obtenidos serán consignados en tres documentos básicos:

- 1.1 Protocolo de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico
- 1.2 Informe de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico
- 1.3 Anexos

1.1 Protocolo de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico

Se utilizará un formato para cada prueba realizada.

El formato 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 llenarán los datos generales sobre cada unidad. Es deseable que la Auditoria tenga la información aquí incluida con anterioridad a las pruebas, con el fin de disminuir el tiempo necesario en el sitio.

Se anotará el nombre de la planta, el tipo de planta (filo de agua o con embalse regulador), la localización de la planta, el número de la unidad,

Consejo Nacional de Operación CNO

la fecha de la prueba, el nombre del propietario o del operador y el percentil al cual se va a realizar la prueba.

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

Se anotarán las capacidades bruta (en bornes de generador) y neta (en bornes de alta tensión del transformador principal), tanto nominal como la efectiva que la unidad puede generar 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.

Dado que para turbinas tipo FRANCIS, existe una relación entre el nivel del embalse y la potencia máxima que puede entregar la máquina, la prueba en cada percentil se realizará a la potencia máxima que puede alcanzar en cada uno de dichos niveles. Estos valores medidos serán registrados en el informe final de estas pruebas.

Para turbinas tipo PELTON, la potencia a la cual se hará la prueba será la misma registrada ante el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC). Para turbinas tipo FRANCIS, la potencia será la máxima correspondiente al nivel del embalse en el cual se hará la prueba.

Se especificará el método de medición de caudal y se incluirán los datos de los instrumentos de medición de energía eléctrica y de caudal 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. Para el caso de medidores de caudal por ultrasonido, se deberá anexar un certificado de patronamiento o la certificación del fabricante sobre la calibración. El nivel del embalse, se leerá directamente de los instrumentos que posea el embalse para este fin.

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

Consejo Nacional de Operación

CNO

cumplimiento a lo dispuesto en la reglamentación vigente relacionado con la medición de energía o a los acuerdos establecidos entre el SIC y cada planta. Para la prueba se medirá la energía en el contador principal.

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). La selección del método de aforo será realizada por cada agente considerando las características propias de cada planta. Los métodos de aforo aparecen descritos en forma detallada en los anexos 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

La fecha de verificación de la calibración de los instrumentos utilizados para la medición de caudal y que requieran calibración no podrá ser mayor a un (1) año.

B. Datos tomados durante la prueba

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

i) Valores instantáneos

Se tomarán las siguientes lecturas instantáneas con intervalos de diez 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 factor de conversión hidráulico. Se utiliza el vatímetro propio de la unidad en la prueba.

Consejo Nacional de Operación

CNO

- Caudal en m³/s con los instrumentos definidos para el método seleccionado (se consideran aceptables los métodos enumerados en A. Información General). En caso de utilizar el método hidrométrico se deberá tener en cuenta el tiempo de rezago o viaje del flujo desde 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 del rango permisible de cinco percentiles (± 5 percentiles) alrededor de nivel de referencia al que se le va a calcular el Factor de Conversión Asociado, o de la banda del 5 por mil de la cabeza bruta.

ii) Valores acumulados

Se utilizará un Método Directo para calcular el Factor de Conversión 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 Sistema Interconectado Nacional.

Se tomarán los siguientes valores acumulados:

- Se medirá la energía eléctrica neta entregada al Sistema Interconectado Nacional 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

Consejo Nacional de Operación CNO

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 Factor de Conversión 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 tomada en cuenta para el cálculo del promedio, sin que sea causal de rechazo de la prueba. 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 8) será firmada por el representante del Propietario u Operador de la planta y por el representante de la Auditoría.

C. Resultados de las pruebas

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 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 factor de conversión asociado a un nivel determinado. Se entiende que el factor de conversión calculado durante la prueba queda asociado con el nivel

Consejo Nacional de Operación CNO

promedio del embalse durante la misma prueba. La función del Factor de Conversión se construirá (ver Anexo No. 7) por parte del Auditor, una vez se realicen las pruebas para los niveles de referencia. (ver Anexo No. 1).

1.2 Informe de Pruebas del Factor de Conversión Hidráulico

En el Informe de Pruebas se consignará el nombre de la planta, propietario u operador, fecha de la prueba y nombre de los representantes del Agente y de la Auditoría que participaron en la ejecución de la misma.

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 (m³/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.

Se consignarán las observaciones particulares a que haya lugar.

1.3 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 (Anexo 8).
- Copia del certificado de calibración de los equipos de medición de caudal (donde sea aplicable).
- Datos técnicos del equipo con que se realizó la medición de caudal (marca, serial, quién operó el equipo).

Consejo Nacional de Operación CNO

- Diagrama que muestre el sistema de medición del caudal, indicando la localización del elemento de medición de flujo así como los instrumentos asociados.
- Podrán anexarse los documentos que, a juicio del Auditor, contribuyan a dar claridad al informe.

Consejo Nacional de Operación

CNO

ANEXO No. 3

MEDIDA DE CAUDAL TURBINADO POR EL MÉTODO DE ULTRASONIDO EN UNIDADES GENERADORAS HIDRÁULICAS

OBJETIVO.

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

ANTECEDENTES Y METODO 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 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.

CARACTERISTICAS TECNICAS 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 / seg., con una precisión del 2%
- Capacidad para medir flujos en tuberías de ½ " hasta 16 pies (12.5 mm hasta 5.000 mm).
- Permitir realizar medidas de flujo en tuberías de acero como de concreto.

Consejo Nacional de Operación

CNO

- 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
- Que pueda ser utilizable en agua limpia, y sucia 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).

ALCANCE DEL MONTAJE DE LOS EQUIPOS y MEDICIÓN

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

- Se revisan las certificaciones de patronamiento de los equipos
- Se prepara una cinta donde se puedan sujetar y montar los sensores en la tubería.
- Se montan los sensores en la tubería de acuerdo al 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 a medidas internas de la tubería y al fluido.

Consejo Nacional de Operación

CNO

CONDICIONES ESPECÍFICAS QUE DEBEN CUMPLIR LOS EQUIPOS A UTILIZAR.

La exactitud de la medida garantizada debe ser de $\pm 2\%$, bajo las siguientes condiciones:

La medida debe hacerse en un tramo rectilíneo de la tubería.

Los tamaños de tuberías deben de estar entre DIN 12.5 a 5.000 mm. (1"-192")

Los Rangos de caudal a medir deben estar entre 1 y 450.000 m³/h. (0.0003 – 125 m³ / seg.)

La velocidad del fluido no debe ser superior a 12 m/seg.

No debe existir el efecto de turbulencia ocasionado por codos o cambios bruscos de dirección cercanos a la zona de los sensores.

PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.

Vea el catálogo de instrucciones del fabricante. Cada firma describe sus equipos, tiene su forma de instalación y restricciones en el proceso de medición. Para el caso de las pruebas de factor de conversión, su instalación es por medio de abrazaderas. Si en alguna planta desean tener medición de eficiencia en forma permanente se pueden instalar los sensores en forma definitiva, pero los reguladores deben tener el servicio de medir eficiencia en forma permanente.

Consejo Nacional de Operación

CNO

ANEXO No. 4

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO EL MÉTODO DE INYECCIÓN DE TRAZADORES

OBJETIVO.

Medir el caudal turbinado para determinar el Factor de Conversión.

PROCEDIMIENTO

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

GENERALIDADES SOBRE TRAZADORES

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

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.

Consejo Nacional de Operación

CNO

- 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.

TRAZADORES UTILIZADOS EN MEDICIÓN DE CAUDALES.

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.

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.

RADIOISÓTOPOS UTILIZADOS

Los mas importantes son los siguientes:

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

Consejo Nacional de Operación

CNO

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

VENTAJAS IMPORTANTES

1. Extraordinaria sensibilidad y resolución de medida
2. Posibilidad de medida "in situ"
3. Vida limitada del trazador

PRECISIÓN DEL MÉTODO

De acuerdo a la norma CEI-EIC-41 el método cumple con la precisión de $\pm 2\%$

MÉTODO DE INYECCIÓN INSTANTÁNEA

Este método consiste en inyectar un volumen (V) de solución radioactiva y con una concentración específica (C1) en forma instantánea dentro del medio. La concentración en un punto de muestreo aguas abajo (C2) 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.

$$C_i * V_i = C * dv \quad (6)$$

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

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

$$\text{Luego } C_i * V_i = Q \int C * dt = A$$

Siendo A la actividad o cantidad de radioisótopos inyectado

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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.

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 de radiotrazador, detección y protección de la población en general y el medio ambiente.

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 a 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.

SEGURIDAD DE LOS TRABAJADORES EXPUESTOS.

Consejo Nacional de Operación CNO

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

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.

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.

Consejo Nacional de Operación

CNO

ANEXO No. 5

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN POR EL MÉTODO DE AFORO HIDROMETRICO

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

Este método, 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:

$$Q = v * A \quad (1)$$

Donde: Q caudal de la sección del flujo, en m³/seg
 v velocidad media de la sección, en m/seg.
 A área de la sección, en m².

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

Consejo Nacional de Operación CNO

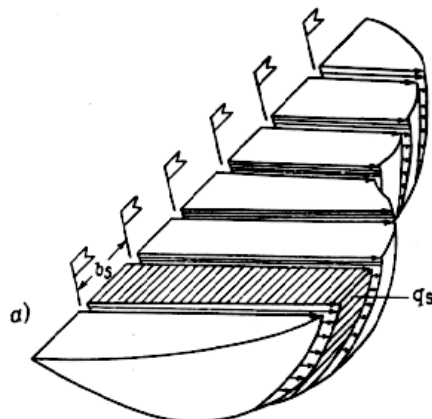


Figura 1. Modelo área - velocidad

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.

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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:

Consejo Nacional de Operación CNO

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

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.

Consejo Nacional de Operación CNO

- La dirección del flujo debe ser normal a la sección de medición.
- Las velocidades deben ser mayores a 0.15 m/seg. y menores de 2.5 m/seg.

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 escorrentómetro, 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 escorrentómetro mecánico para la medición de la velocidad, se recomienda que cada medición tenga al menos una duración de 45 segundos.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO No. 6 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE CAUDALES, UTILIZANDO EL METODO DE DIFERENCIA DE PRESIONES

INTRODUCCIÓN.

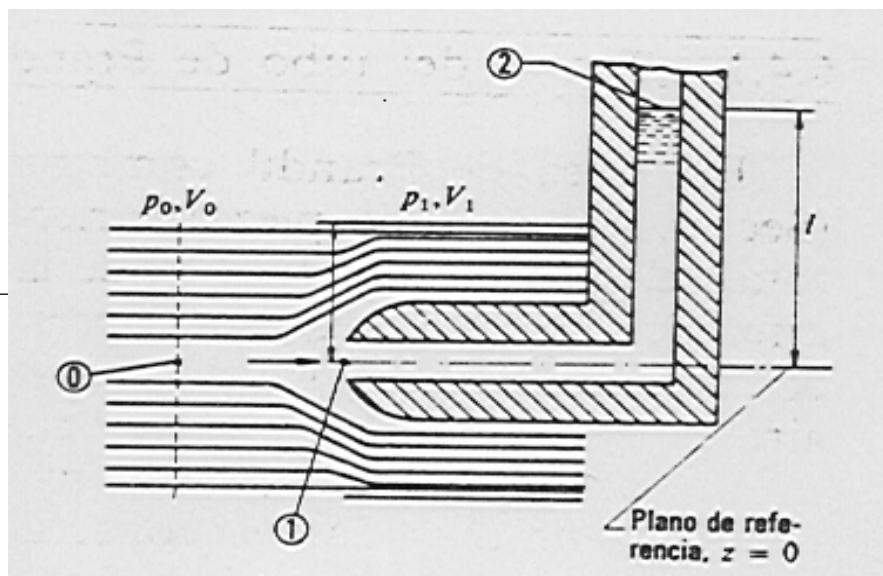
En el presente Anexo se describen los Métodos de medición de caudales que son utilizados en centrales Hidroeléctricas como son el Tubo Pitot y el Tubo Prandtl. Con estos métodos se pueden medir caudales en conductos cerrados antes de turbinar con una precisión hasta de $\pm 2\%$, de acuerdo con la tabla 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.

METODO DE MEDICION 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 siguiente 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:

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



Consejo Nacional de Operación CNO

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
- $\gamma = \rho * g$ 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 formula expresa la presión de estancamiento en el tubo Pitot.

Donde:

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

y

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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:

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

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

La formula que definimos últimamente nos permite calcular el caudal que pasa por una tubería de una Central Hidroeléctrica a través del método del Tubo Pitot.

METODO DE MEDICION DE CAUDAL POR MEDIO DEL TUBO DE PRANDTL EN CONDUCTOS CERRADOS EN CENTRALES HIDROELECTRICAS.

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

Consejo Nacional de Operación CNO

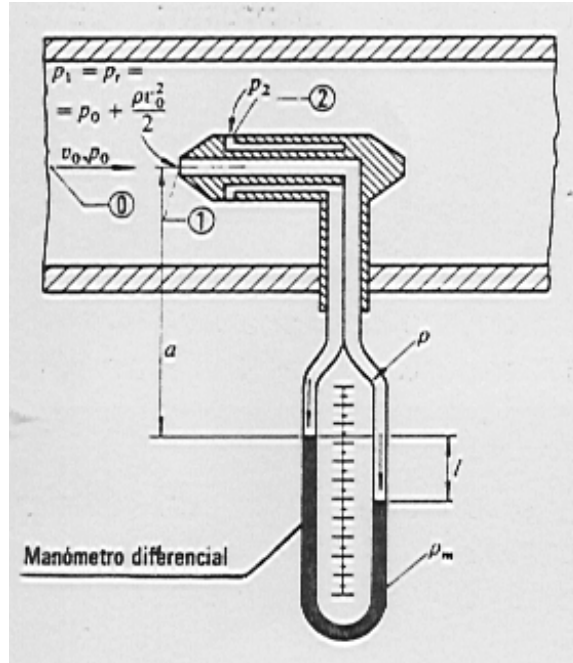


Figura 2

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:

$$P_1 = P_t \quad V_1 = 0$$

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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:

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

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

Consejo Nacional de Operación CNO

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

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:

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

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

Donde C_v - 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 al 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 - 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.

Consejo Nacional de Operación CNO

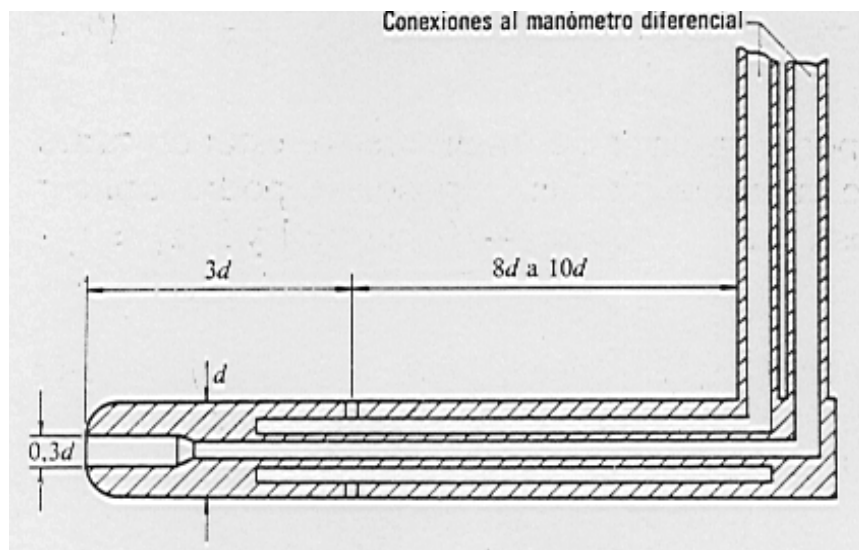


Figura 3

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.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO No. 7

PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FUNCION DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO Y EL CÁLCULO DEL FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO MEDIANO

El procedimiento general es el siguiente:

- 1.- Un Consultor dentro de los preseleccionados por el CNO auditará las pruebas y calculará el Factor de Conversión para cada nivel seleccionado.
- 2.- A partir de los valores de factor de conversión medidos para cada nivel, calculados como se indicó en el numeral 5 del presente Protocolo, el Auditor utilizará el método que dé mejor ajuste estadístico y construirá la gráfica de la relación entre el Factor de Conversión y su nivel asociado. Para la construcción de esta gráfica podrá tomar, además de los puntos asociados a los percentiles característicos otros puntos de pruebas realizadas dentro del programa de campo en el mismo periodo y en otras cotas que considere darán un ajuste mejor.
- 3.- El Auditor extrapolará la función obtenida en el anterior numeral 2, de tal forma que cubra el rango entre el nivel mínimo técnico y nivel máximo físico.
- 4.- Con la función ya obtenida , se estima el factor de conversión mediano para el nivel asociado al percentil 50.
5. Las plantas filo de agua estimarán su factor de conversión con una sola prueba, tal como se menciona en el numeral 9 del documento denominado "PROTOCOLO PARA LA ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE PLANTAS HIDRÁULICAS" del presente Acuerdo.
6. Una vez determinada la curva "Cota vs. Factor de Conversión" siguiendo los lineamientos estipulados en el presente Protocolo, la

Consejo Nacional de Operación CNO

misma tendrá una vigencia de cinco (5) años contados a partir del día siguiente a aquel en que se realizó la última medición con base en la cual se estableció la curva definitiva "Cota vs. Factor de Conversión" o a partir de la homologación de que tratan los acuerdos 198 y 247 del Consejo Nacional de Operación, lo que sea más tarde.

7. Durante los cinco (5) años de vigencia de la curva, se reporta a la CREG anualmente el valor del Factor de Conversión correspondiente al percentil 50 leído sobre la curva vigente. El percentil 50 cambiará cada año debido a que el quinquenio que se toma como referencia es el correspondiente al que termina el 31 de diciembre del año inmediatamente anterior.

Consejo Nacional de Operación CNO

ANEXO No. 8

																								FORMATO 1 DE 2					
PROTOCOLO DE PRUEBA																													
FACTOR DE CONVERSIÓN HIDRÁULICO																													
PLANTAS HIDRÁULICAS																													
A. INFORMACIÓN GENERAL																													
Planta														# Unidades				Fecha de la prueba											
Propietario/Operador														Localización															
Tipo de Turbina		Pelt on Fra nci s Otr a												Model o				Inicio Operación Comercial											
TURBINA		Fabricante																											
CAPACIDAD, kW		Brut a				Neta																							
Nominal																													
Efectiva actual																													
Horas Operación		Totale s				Desde último mantenimiento. mayor																							

Consejo Nacional de Operación CNO

GENERADOR	Fabricante								Capacidad, kVA				Voltaje, V				Cos ☐							
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	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																								
Planta								# Unidades				Fecha de la prueba												
B. DATOS TOMADOS DURANTE LA PRUEBA																								
1. VALORES INSTANTÁNEOS																								
Tiempo	Potencia				Percentil del				Nivel del Embalse				Caudal											
	MW				Nivel				m.s.n.m.				m³/s											

Consejo Nacional de Operación

CNO

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----