

HIDRAULICIDAD E IRREGULARIDAD DEL AÑO HIDRAULICO Y SU REPERCUSION EN LA PRODUCCION HIDROELECTRICA. DETERMINACION DEL AÑO TIPICO HIDROELECTRICO (*)

Por JESUS M.^a CRISTOBAL ZUBIZARRETA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En el presente artículo se pretende llamar la atención sobre dos hechos relacionados entre sí. Por un lado sobre la simplificación usual, excesivamente simplista, que supone calificar a un año, a efectos hidroeléctricos, única y exclusivamente por su coeficiente de hidraulicidad, olvidando una característica importantísima, como es la distribución temporal de la aportación de ese año. Por otro lado, sobre la práctica muy frecuente, relativamente poco aproximada a la realidad, de suponer cuando se trata de evaluar en un tanteo previo la producción media de un salto, que esta producción media es la producción correspondiente a un año de hidraulicidad media, es decir, a un año cuyo coeficiente de hidraulicidad sea la unidad.

Así pues, el objetivo del artículo consiste en poner de relieve a través de la exposición del mismo, la falta de aproximación de los dos hechos antes mencionados y la forma de obviar la misma.

La oportunidad del artículo es grande si se consideran las condiciones hidrológicas del último año hidráulico 1969-70. En efecto, es "vox populi" que el último año hidráulico ha sido malo, pero conviene llamar la atención sobre un hecho y es que su coeficiente de hidraulicidad ha sido de 2, por ejemplo, para algunos ríos de la provincia de Huelva, y muy superior a la unidad para los ríos de todo el territorio peninsular, lo que quiere decir que la aportación de agua de los ríos ha sido muy superior a su aportación media o normal. Parece existir a primera vista una contradicción entre esto y la escasez de agua subsiguiente a dicho año hidráulico, lo cual se explica fácilmente si se tiene en cuenta el coeficiente de irregularidad del año, que toma un valor superior a 6 para determinados ríos de la provincia de Huelva, y valores también muy altos para el resto del territorio nacional, lo que obedece al hecho de que prácticamente toda la aportación del año ha venido concentrada en el mes de enero.

1. Introducción del índice de irregularidad para la clasificación de un año hidráulico.

En la actualidad, al hablar de un año hidráulico en su conjunto, y para dar idea en forma resumida de cómo ha sido el mismo, se suele dar como dato característico el coeficiente de hidraulicidad, que es, como se sabe, la relación entre la aportación del año hidráulico considerado y la aportación media.

Postulamos, sin embargo, que la información que da este coeficiente sobre el año hidráulico es escasa, sobre todo a efectos de la presunta producción energética obtenida en el mismo.

Este aserto lo confirma el hecho, de que con mucha frecuencia puede verse que en dos años de la misma hidraulicidad, la producción obtenida es muy diferente, sin que hubiesen variado sensiblemente los demás condicionantes externos de esta producción, como pueden ser la de-

manda de energía que afecta a la central productora, dificultades extraordinarias de explotación, averías importantes, etc. También se da con frecuencia el hecho de que, comparando la producción obtenida en dos años de muy distinta hidraulicidad, sea mayor la correspondiente al año de hidraulicidad menor, sin que hubiesen variado en forma apreciable las condicionantes externas antes mencionadas.

La explicación a estas paradojas aparentes está en que hemos simplificado excesivamente el año, al clasificarlo únicamente por su coeficiente de hidraulicidad, y hemos olvidado un factor muy importante a efectos energéticos, como es la distribución de las aportaciones a lo largo del año.

Creemos que un año hidráulico debe ser catalogado, en lugar de por un sólo número como se hace actualmente, por un vector de dos componentes, entendiendo por tal un par de números ordenados, el primero de los cuales representa el coeficiente de hidraulicidad h del año y el segundo un nuevo coeficiente, al que

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1971.

llamamos índice de irregularidad i , el cual es un exponente de la distribución de las aportaciones a lo largo del año, es decir, de su mayor o menor irregularidad.

Para la determinación de este índice i , consideramos la distribución mensual de la aportación anual, y al valor así determinado podemos llamarle índice de irregularidad mensual. El mismo procedimiento podría aplicarse a la aportación diaria, pero creemos que en este caso el cálculo de i sería excesivamente laborioso, ya que para cada año habría que operar con trescientos sesenta y cinco días o datos de partida.

Así, pues, suponemos que el índice de irregularidad i , que junto con el coeficiente de hidraulicidad h va a definir el año en forma resumida, es un índice mensual y proponemos que su valor se obtenga mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$i = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=12} \left(m_n - \frac{100}{12} \right)^2}}{12} \quad (1)$$

siendo i = índice de irregularidad del año considerado m_n = porcentaje de la aportación en el mes n , referida a la aportación anual.

Naturalmente estos porcentajes mensuales m_n verifican la condición:

$$\sum_{n=1}^{n=12} m_n = 100$$

Esta fórmula ha sido adoptada por ser semejante a la de la desviación típica de una variable estadística, desviación típica que es un índice de la dispersión o distribución de los valores de la variable respecto de la media.

Hemos supuesto que el año absolutamente regular es aquel en que viene la misma aportación todos los meses, es decir, que el porcentaje correspondiente a cada mes es $100/12$ para todos ellos. A este año de regularidad absoluta le corresponde un índice de irregularidad $i = 0$, es decir, que su irregularidad es nula.

Por otra parte, el valor máximo de i , corresponde al caso en que toda la aportación del año venga concentrada en un solo mes, y este valor máximo es $i = 7,90$.

Así, pues, el índice de irregularidad i puede

variar entre 0 y 7,90 y redondeando podemos suponer que varía entre 0 y 8.

De esta forma un año hidráulico puede catalogarse en forma resumida mediante un vector, entendiendo por vector un par de números ordenados (h, i) . La producción energética depende de ambos números, pero en forma inversa, ya que a igualdad de otras circunstancias, ésta será tanto mayor cuanto más grande sea h y más pequeño sea i .

Sin embargo, conviene resaltar una particularidad importante del índice de irregularidad i , que no existe en el coeficiente de hidraulicidad h , y es que así como la relación entre el coeficiente de hidraulicidad h y la aportación anual es biunívoca, la relación existente entre la distribución porcentual de las aportaciones mensuales y el coeficiente i no lo es, ya que a una determinada distribución le corresponde un único coeficiente i , pero a un coeficiente i le corresponden infinitas distribuciones.

El hecho de que la relación entre la distribución mensual de la aportación anual y el índice de irregularidad i no sea biunívoca hace que aun manejando los dos coeficientes h e i , para dar en forma resumida el año hidráulico, éste no queda totalmente definido, ya que a un mismo valor de i , le pueden corresponder infinitas distribuciones distintas. Sin embargo, y aun reconociendo esta limitación en la información que suministra el coeficiente i , creemos que con su utilización se amplía notablemente la caracterización del año hidráulico, que hasta ahora se realiza única y exclusivamente mediante el coeficiente h . Hay que reconocer, no obstante, que se pueden dar casos excepcionales de discordancias relativamente notables por la falta de biunivocidad antes apuntada, pero con independencia de estos casos, creemos que como norma general, las producciones de una misma central, correspondientes a años semejantes, entendiendo por tales aquellos que tienen coeficientes h e i sensiblemente iguales, serán muy parecidas, suponiendo siempre, claro está, que no hayan variado los demás factores que intervienen en la energía suministrada por dicha central.

La influencia o repercusión del valor del coeficiente i , sobre la producción de la central, depende de diversos factores, entre los que destacan la hidraulicidad h del año por un lado, que es un factor hidrológico, la capacidad del embalse de regulación adosado a la central, que

es un factor regulante y la elasticidad de la demanda de energía que afecta a la central que se está considerando, que es un factor de mercado.

Respecto de la hidraulicidad, diremos que la repercusión del coeficiente i sobre la producción de la central, es mayor para las hidraulicidades intermedias, entendiendo por tales las que no son ni muy pequeñas ni muy grandes, y el efecto es menor para las hidraulicidades extremas. Así, aunque sea un caso teórico, para una hidraulicidad prácticamente nula, la producción sería sensiblemente nula, para cualquier valor del índice de irregularidad i , y para una hidraulicidad muy grande, la producción sería siempre la máxima que pudiera ser colocada en el mercado, sea cual fuere el valor del coeficiente i .

En cuanto a la capacidad del elemento regulante que afecta a la central, puede decirse que cuanto mayor es ésta, más pequeño es el efecto de la irregularidad del año sobre la producción. De todos es sabido, que en un salto fluyente se producen diferencias muy grandes en la producción obtenida en años de igual hidraulicidad, lo cual se debe a la diferente irregularidad de los mismos, mientras que en centrales con embalse de regulación grande, el efecto de la irregularidad del año sobre la producción obtenida en la central es mucho menos importante, como puede comprobarse repetidamente.

Respecto de la elasticidad de la demanda de energía que afecta a la central, se comprende fácilmente que cuanto más flexible sea esta demanda respecto de la oferta de producción correspondiente a la central que se considera, menor será el efecto del coeficiente i sobre la producción y, por el contrario, si la demanda es rígida, a un incremento en el coeficiente i , le corresponderá un decremento notable en la producción.

Para dar una idea de los valores que toma el índice de irregularidad i , para distintas distribuciones mensuales de la aportación anual, incluimos el cuadro siguiente:

N.º de meses.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Índice de Irregularidad.	7,90	5,35	4,12	3,36	2,82	2,38	2,02	1,68	1,37	1,06	0,70	0,00

En este cuadro se supone que la aportación anual se concentra y se reparte por igual en el número de meses que se indican en el mismo.

Como ejemplo confirmatorio de lo aquí expuesto, damos a continuación un cuadro de producciones referido a una central del nordeste de España, cuadro que ha sido obtenido como resumen de un estudio de explotación realizado y en el que se han hecho dos hipótesis: la hipótesis I supone que el volumen útil del embalse es de 130 Hm.³, y la hipótesis II supone el embalse recrecido con un volumen útil de 280 Hm.³

Producciones en la central estudiada.

AÑOS	Coeficiente de hidraulicidad (h)	Índice de irregularidad (i)	PRODUCCIONES (GWh) (1)	
			Hipótesis I	Hipótesis II
48-49	0,35	1,22	76	96
52-53	0,70	0,67	135	186
53-54	0,80	1,41	149	210
54-55	0,90	1,08	159	229
50-51	1,00	2,25	125	192
55-56	1,00	1,12	171	245
55-56	1,10	1,12	180	257
60-61	1,10	3,14	131	197
30-31	1,20	1,39	180	260
33-34	1,20	1,30	172	251
58-59	1,30	1,56	185	258
59-60	1,85	1,20	198	269

(1) Hipótesis I: volumen útil de embalse = 130 Hm.³.
Hipótesis II: Volumen útil de embalse = 280 Hm.³.

En los años históricos que figuran en el cuadro, se ha aplicado un coeficiente de proporcionalidad, que en todos los casos es muy próximo a la unidad, a las aportaciones mensuales de un mismo año hidráulico, con objeto de redondear los coeficientes de hidraulicidad, pero sin haberse modificado por esto la distribución porcentual de las aportaciones mensuales, con lo que se ha mantenido intacto el índice de irregularidad.

En el cuadro puede verse que, comparando los años 50-51 y 55-56 de la misma hidraulicidad 1,00, les corresponden a cada uno de ellos producciones muy distintas, y lo mismo ocurre para los años 55-56 y 60-61 de hidraulicidad 1,10. La explicación está en la gran diferencia existente en los índices de irregularidad respectivos. Si comparamos, por otra parte, el año 60-61 de hidraulicidad 1,10 con el año 52-53 de hidraulicidad 0,70 puede verse que en la hipótesis I es mayor la producción del año 0,70 lo cual no tendría explicación si no tuviéramos en cuenta

la gran diferencia que hay entre los índices de irregularidad, y que explica la aparente paradoja de que hemos hablado al principio, mientras que en la hipótesis II, a la que corresponde un embalse mucho mayor, la producción del año 52-53, es inferior a la del 60-61, lo cual confirma también la tesis de que el efecto de la irregularidad del año sobre la producción es menor cuanto mayor sea la capacidad del embalse.

También puede verse en el cuadro que para ambas hipótesis I y II, la producción en el año 53-54, de hidraulicidad 0,80 es superior a la del año 60-61 de hidraulicidad 1,10, lo que se explica también por los índices de irregularidad respectivos.

Por último, comparando los años 30-31 y 33-34, ambos de hidraulicidad 1,20, se ve que la producción del año 33-34 es ligeramente inferior, lo cual se corresponde con el hecho de que el índice de irregularidad del primero, sea ligeramente superior.

Resumen.

La introducción del coeficiente i es un paso muy valioso, aunque no definitivo, en orden a tener una información resumida del año hidráulico, mucho mayor que la suministrada únicamente por el coeficiente de hidraulicidad h , ya que dicho coeficiente i , es un índice de la irregularidad de la distribución de las aportaciones mensuales dentro del año, distribución que tiene notable repercusión en la producción de la central.

Aplicaciones.

1. La introducción del índice de irregularidad permite juzgar, apriorísticamente, con mayor aproximación, sobre la producción obtenible en una central en un año (h, i) dado, y si el año ya se ha producido y la producción obtenida es un dato conocido, la comparación entre esta producción y la presumible para un año de sus características (h, i) , permite formar una primera opinión sobre la buena o mala explotación de la central. Decimos que se puede formar una primera opinión, porque en los resultados obtenidos puede haber influido no sólo una buena o mala explotación, sino las variaciones de otros condicionantes exteriores, como pueden ser la demanda de energía que afecta a la central, dificultades extraordinarias de explotación

por grandes deterioros en la obra civil, importantes averías en las máquinas, inundaciones, etcétera.

La introducción de este índice de irregularidad i , nos permite juzgar con un criterio mucho más preciso sobre la buena o mala explotación de un embalse en relación con la producción de energía. En efecto, hasta ahora, en general, tiende a asociarse mentalmente la producción, exclusivamente con la hidraulicidad del año, pero esto es a todas luces insuficiente ya que como sabemos, la producción no sólo depende de la hidraulicidad, que es el criterio simplista que se sigue con demasiada frecuencia, sino que también depende, y en forma muy importante, de la irregularidad del año, y para saber si la producción obtenida en un año dado está de acuerdo con la que se podía esperar con arreglo a las condiciones del mercado de demanda en ese año, es preciso que tengamos en cuenta, no sólo la hidraulicidad, sino también la irregularidad que viene medida por el coeficiente i .

2. Sirve para definir lo que hemos llamado año típico hidroeléctrico, concepto éste que puede verse en el apartado siguiente.

3. La consideración del coeficiente i , permite comparar la irregularidad, bien de un mismo río en dos puntos distintos de su cauce o bien de dos ríos distintos en puntos determinados.

En efecto, supongamos que disponemos de las series hidrológicas de dos ríos distintos en puntos determinados de los mismos. Determinamos los índices de irregularidad de cada uno de los años de la serie para ambos ríos, y luego utilizamos un indicador medio de estos coeficientes, que puede ser la media, la moda, la mediana, etc. Puede decirse, que con arreglo a los datos de que se disponen en ese momento, es más irregular el río al que corresponde un valor mayor del indicador medio adoptado del índice de irregularidad.

2. Determinación del año típico a efectos hidroeléctricos.

Cada vez se usa menos el calcular la producción media hidroeléctrica, a partir de un año único, que se toma como representativo de la serie más o menos larga de que se disponga, exis-

tiendo la tendencia opuesta consistente en ampliar por cualquier procedimiento lógico las series de partida, bien por simulación o mediante el ajuste de una ley de distribución del tipo de Goodrich, etc., lo cual se debe, en gran medida, a la facilidad operativa consiguiente al gran desarrollo que en los últimos tiempos ha adquirido y sigue adquiriendo la cibernética.

Sin embargo, todavía en algunos tanteos previos no muy afinados, puede operarse con un solo año, estimado como típico o representativo de la serie, para obtener una producción media aproximada. Es sobre este caso sobre el que queremos razonar.

Comenzaremos por decir que llamamos año típico hidroeléctrico, por definición, a aquel año hidráulico real o ficticio, cuya producción sea igual o muy parecida a la producción media que se obtendría utilizando todos los años de la serie de partida. Todo lo que sigue está orientado a señalar el procedimiento de obtención

supone un ahorro de trabajo notable, ya que en lugar de calcular la producción en n años, se calcula la producción en un solo año, que es el año típico hidroeléctrico.

Nuestro objetivo, pues, es determinar este año, de forma que la producción resultante sea lo más parecida posible a la producción media que se hubiese obtenido al considerar los n años de la serie.

Para determinar este año típico, es preciso fijar la aportación anual y la distribución porcentual de esta aportación a lo largo de los meses.

Vamos primero a exponer el procedimiento de determinación de la aportación anual, o lo que es lo mismo, del coeficiente de hidraulicidad del año típico.

Para ello, partiendo de los n años de la serie hidrológica de partida, dibujamos la curva de frecuencias de las hidraulicidades (fig. 1).

El paso siguiente consiste en determinar, en el momento en que se hace el estudio, el tur-

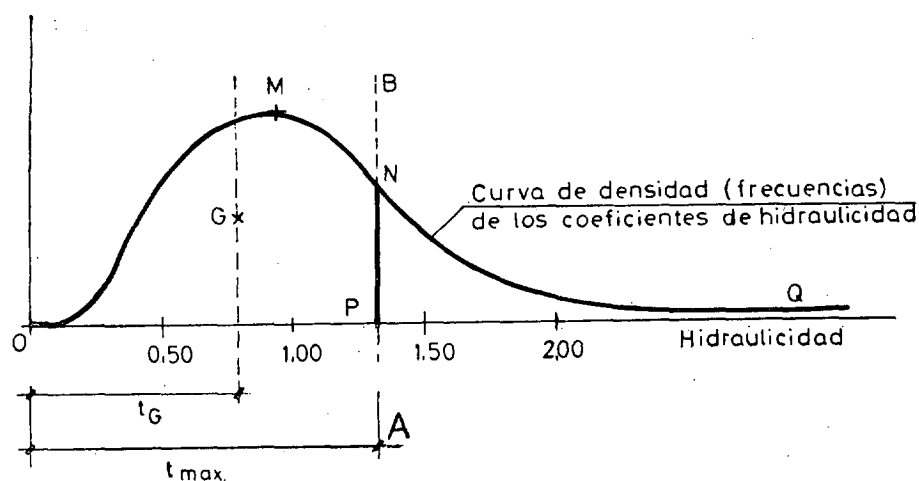


Figura 1.

del año típico hidroeléctrico definido anteriormente.

Así, pues, supongamos que queremos hallar la producción media de una central hidroeléctrica y que disponemos para ello, como datos de partida, de una serie hidrológica de n años. Si en un primer tanteo no queremos utilizar para obtener la producción media toda la serie, por razones de trabajo y de tiempo, podemos calcular la producción correspondiente a lo que antes hemos definido como año típico, lo cual

binado máximo anual $T_{\text{máx.}}$ de la central, el cual depende de dos factores: uno estático o estable y otro dinámico o variable con el tiempo. El primero viene dado por el caudal nominal Q de las turbinas y el segundo por el máximo número de horas de funcionamiento $H_{\text{máx.}}$ que va a admitir el mercado de demanda de energía que afecta a la central en estudio, factor éste que es esencialmente variable con el tiempo, ya que depende de las características totales del mercado eléctrico nacional, tanto de oferta

como de demanda. Por otra parte, la determinación del valor de $H_{\text{máx.}}$ es ciertamente difícil y no hay más remedio que hacer una estimación lo más aproximada posible.

Puede establecerse la igualdad:

$$T_{\text{máx}} = Q \times H_{\text{máx}} \times 3600$$

Dividiendo $T_{\text{máx.}}$ por la aportación media A_m obtenemos el valor de $t_{\text{máx.}}$, que puede definirse como el turbinado máximo anual referido a la aportación media:

$$t_{\text{máx}} = \frac{T_{\text{máx}}}{A_m}$$

En el gráfico de frecuencias de las hidraulicidades (fig. 1) señalamos en el eje de abscisas (hidraulicidades) el valor correspondiente a $t_{\text{máx.}}$ y trazamos por ese punto la vertical A B.

La hidraulicidad t_G del año típico hidroeléctrico vendrá dada por la abscisa del c.d.g. G del área O M N P, pero entendiendo, y esto es sumamente importante, que en la recta N P está acumulada el área N P Q, es decir, el área que queda a la derecha de la recta A B.

La explicación de esto es sencilla, ya que la hidraulicidad t_G del centro de gravedad, no es más que la media ponderada de toda la gama de hidraulicidades, suponiendo que para las hidraulicidades superiores a $t_{\text{máx.}}$ se toma el valor $t_{\text{máx.}}$, lo cual se debe a que no se puede turbinar una aportación superior a $t_{\text{máx.}} = t_{\text{máx.}} \times A_m$.

En efecto, el peso de las distintas hidraulicidades es la ordenada de la curva de frecuencias (densidad) y, por tanto, la media ponderada coincide con el centro de gravedad del área antes mencionada.

Así, pues, el valor t_G es el valor medio ponderado de las aportaciones turbinadas, referidas a la aportación media, y adoptamos este valor medio ponderado como representativo del año típico hidroeléctrico.

Esto puede verse con más claridad en el ejemplo que incluimos al final.

De esta forma se determina el coeficiente de hidraulicidad t_G del año típico hidroeléctrico y, por consiguiente, la aportación anual del mismo, pues basta multiplicar este valor por la aportación media de la serie.

Falta ahora fijar la distribución de esta aportación

anual a lo largo de los meses, cosa que como se ha visto antes es de una gran importancia en los resultados obtenidos.

Para esto utilizamos el índice de irregularidad i , anteriormente preconizado, calculando para cada uno de los n años de la serie hidrológica el valor del mismo. Se dispone así de n valores de i y tomamos como i del año típico hidroeléctrico el de mayor frecuencia de presentación, es decir, el i modal.

Obtenido el valor de i , correspondiente al año típico, falta todavía fijar la distribución porcentual de las aportaciones mensuales, ya que anteriormente se ha dicho que a un mismo valor de i corresponden infinitas distribuciones diferentes, si bien todas ellas dan en la mayor parte de los casos resultados muy parecidos en cuanto a la producción obtenida con los mismos.

Adoptamos como distribución porcentual mensual del año típico hidroeléctrico, la del año histórico de la serie de partida que tenga el valor de i más próximo al i modal, y en caso de que hubiera dos o más, tomamos como distribución porcentual mensual del año típico, la del año histórico, cuyo coeficiente de hidraulicidad se aproxima más al del año típico.

De esta forma queda definido de forma absoluta el año típico. Su hidraulicidad t_G será la del centro de gravedad antes mencionado y la distribución porcentual mensual de la aportación anual, la definida en el párrafo anterior.

Puede decirse, como final, que existe la tendencia generalizada de considerar como coeficiente de hidraulicidad del año típico a efectos hidroeléctricos, la unidad, cosa que en realidad no puede ocurrir nunca, ya que el valor ha de ser siempre inferior, como consecuencia de la limitación en el turbinado anual $T_{\text{máx.}}$, que existe siempre. La hidraulicidad unidad es la hidraulicidad del año típico hidrológico, pero no la del año típico hidroeléctrico, tal y como lo hemos definido al comienzo del apartado.

Incluimos un ejemplo aclaratorio, correspondiente también a la central mencionada anteriormente. Se disponía como dato de partida, de una serie hidrológica de veintidós años de suficiente confianza, con los cuales se ha ajustado una función de distribución de los coeficientes de hidraulicidad del tipo Goodrich, y de ésta se ha deducido la curva de densidad y la tabla de frecuencias relativas de las hidraulicidades.

En el cuadro siguiente se incluye el cálculo del coeficiente de hidraulicidad del año típico hidroeléctrico correspondiente a la central estudiada y que en este caso resulta ser 0,84. El valor de $t_{\text{máx.}}$ es 1,01.

Determinación del coeficiente de hidraulicidad del año típico hidroeléctrico

Coeficiente de hidraulicidad (h)	(1) Frecuencia relativa (f)	(2) Distancia al origen	(1) × (2)
0-0,25	0,015	0,125	0,002
0,25-0,35	0,025	0,30	0,008
0,35-0,45	0,035	0,40	0,014
0,45-0,55	0,055	0,50	0,027
0,55-0,65	0,070	0,60	0,042
0,65-0,75	0,085	0,70	0,059
0,75-0,85	0,095	0,80	0,076
0,85-0,95	0,100	0,90	0,090
0,95-1,01	0,057	0,98	0,056
> 1,01	0,463	1,01	0,467
Suma	1,000		0,841
$t_G = \frac{0,841}{1,000} = 0,841$			

Por otra parte, la distribución de los valores del coeficiente de irregularidad i en la central

considerada indica que el valor más frecuente es: i modal = 1,05.

De acuerdo con esto, el año típico hidroeléctrico tendrá una hidraulicidad de 0,84 y su distribución porcentual mensual será la del año 54-55, al cual le corresponde un valor de $i = 1,06$, lo que quiere decir que las aportaciones mensuales del año típico hidroeléctrico serán las del año 54-55, multiplicadas por un coeficiente de proporcionalidad $\frac{0,84}{0,90}$, con objeto de que la hidraulicidad del año sea 0,84, ya que la hidraulicidad del año 54-55 es 0,90.

Las producciones correspondientes al año típico así determinado son:

	Hipótesis I	Hipótesis II
Producción año típico hidroeléctrico	148 GWh.	213 GWh.

mientras que las producciones medias obtenidas con todos los años de la serie son:

	Hipótesis I	Hipótesis II
Producción media de la serie.	150 GWh.	211 GWh.

Como se ve, la concordancia de resultados puede estimarse como perfecta.