

# ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA DINAMO MOVIDA POR UNA TURBINA HIDRÁULICA MEDIANTE DISEÑOS FACTORIALES

M. ALBEA RODRIGUEZ, E. VILLAR MESA

Universitat Politècnica de Catalunya

*Este artículo es el resultado de una práctica voluntaria de carácter académico, referida al temario de la asignatura de Estadística de tercer curso de la Escuela de Ingenieros Industriales.*

*Por tanto, el objetivo principal es ver cómo mediante un conjunto reducido de experimentos, el diseño fraccional permite extraer información de un proceso o sistema sometido a la influencia de un número elevado de factores.*

**Analysis of electricity production with a dynamo moved by a hydraulic turbine, using factorial designs.**

**Keywords:** Factorial and Fractional Designs; Turbine; Dynamo; Pipes and Angles; Voltage Measurement.

## 1. EL SISTEMA

### 1.1 Introducción

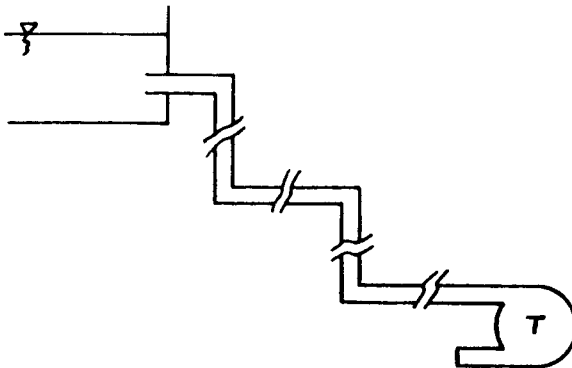
Es siempre de gran interés pero especialmente en Ingeniería, obtener el máximo rendimiento de las instalaciones proyectadas.

Se plantea averiguar qué disposición permite obtener la mayor cantidad de energía eléctrica de un salto de agua que acciona una turbina solidaria a una máquina productora de electricidad, en este caso una dinamo.

Para ello será necesario construir:

- Depósito de agua, fuente de energía,
- Conducciones de agua, desde el depósito a la turbina,
- Turbina de álabes,
- Transmisión a la máquina eléctrica del movimiento.

La estructura de un salto de agua es conocida, representada en la figura 1.1.1.

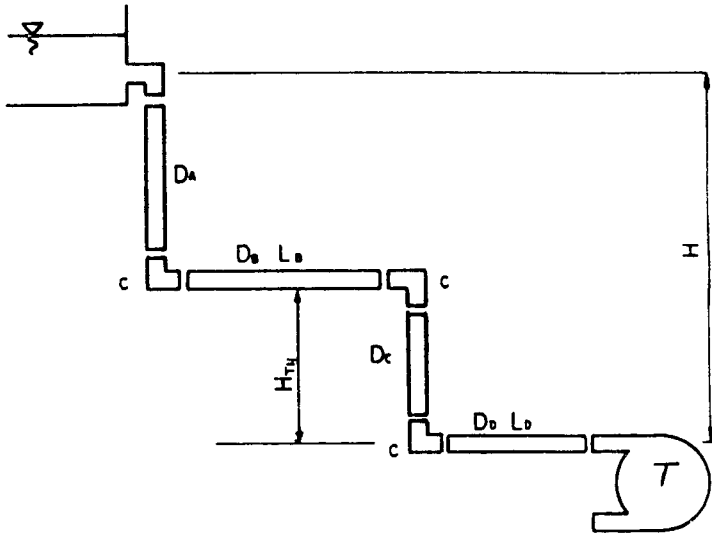


**Figura 1.1.1:** Los distintos tramos representan los posibles cambios de nivel e inclinación en la conducción; asimismo, aparecerán codos y cambios de sección según sea necesario.

## 1.2 Consideraciones previas

Según lo expuesto en el apartado anterior, el estudio se centrará en averiguar cuál es la disposición más adecuada para conseguir un máximo de energía eléctrica. Ésta será registrada como la diferencia de potencial que aparecerá en los bornes de la máquina eléctrica.

El sistema con el que experimentaremos será, por tanto el de la figura 1.2.1.



**Figura 1.2.1:** Sistema experimental.

Mantendremos la altura total  $H$  constante, pues es un dato de partida, ya que el desnivel existente entre el depósito y la turbina, es fijo. Por motivos constructivos, quedará fijado en 2 metros.

Del mismo modo serán constantes los diámetros del desagüe del depósito y la entrada y salida de la turbina. Nuestra intención es obtener el máximo de energía partiendo de una turbina y un salto de agua dados, actuando sobre la conducción del agua, por tanto no emplearemos como variables los diámetros mencionados.

### 1.3 Variables

Teniendo en cuenta la disposición vista en el apartado anterior, las variables que consideraremos en el estudio serán:

- Diámetro de los distintos tramos de tubo:  
Se escogieron, de entre los distintos tamaños disponibles en el mercado, uno grueso de 1/2 pulgada, y otro más fino, de 3/8 de pulgada. Esto permitirá observar la influencia de la sección de las conducciones.

- **Altura del tramo horizontal:**  
Tratará de modelizar la presencia de inflexiones en distintas posiciones de la conducción.
- **Longitud de los tramos horizontales:**  
Su presencia debería ocasionar pérdidas de carga que disminuyen el rendimiento.
- **Tipo de codos:**  
Para simplificar el experimento, todos los codos variarán a un tiempo; esto quizá enmascare alguna información, dado que alguna posición puede ser más adecuada para un cierto tipo de codo que otra, pero lo más importante es la pérdida de carga singular que origina cualquier posición. Por ello se han escogido codos de 1/2 y 3/8 de pulgada, acordes con los tubos empleados.

En la tabla 1.3.1, esquematizaremos el número de factores introducidos.

**Tabla 1.3.1**  
Número de factores

VARIABLES	FACTORES
Diámetro de cada tramo	4
Altura del tramo horizontal	1
Longitud del tramo horizontal	2
Tipo de codos	1
Total factores introducidos	8

Hecha esta descripción, veamos qué valores asignamos a estas variables:

★  $H_{TH}$  altura del tramo horizontal

+ 1700 mm

- 300 mm

★  $D_A, D_B, D_C, D_D$  diámetros de los tubos

+ 1/2 pulgada

- 3/8 pulgada

★  $L_B, L_D$  longitudes tramos horizontales

+ 1000 mm

- 0 mm

★  $C$  tipo de codos

+ 1/2 pulgada

- 3/8 pulgada

Tenemos por tanto 8 factores, con lo que si pretendiéramos realizar un diseño factorial completo, necesitaríamos 256 experimentos elementales. Este número es muy elevado; veremos que con un número reducido de ellos podremos obtener resultados interesantes.

### La Turbina

Pasamos ahora a describir brevemente cómo construimos la turbina que empleamos en el experimento. Recomendamos seguir las explicaciones en el croquis de la figura 1.4.1.

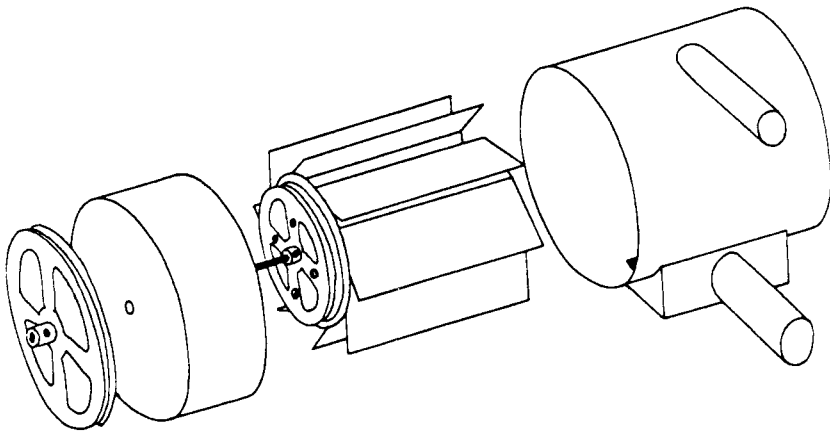


Figura 1.4.1: Croquis de la turbina.

La parte fundamental es el rodete de álabes. Se decidió construirlo con 8 álabes; estos están recortados en hojalata procedente de una lata de conservas. Una vez cortados se procedió a igualar sus dimensiones limándolos juntos sujetos en un tornillo de taller.

Cuando sus dimensiones se ajustaban a las deseadas, se procedió a soldarlas sobre una plancha circular (la tapa de la lata) que previamente había sido fijada mediante tornillos a una pieza de Meccano que permite anclar el rodete en el eje, también procedente de Meccano. Sólo resta dar inclinación adecuada a los álabes, con lo que el rodete queda ya dispuesto.

La carcasa exterior de la turbina es una lata de conservas de la dimensión apropiada para alojar en su interior el rodete, con el ajuste adecuado.

Para permitir el montaje y apertura de la turbina, la carcasa está dividida en dos partes. La mayor presenta la entrada de agua y un cajón de desagüe en la parte inferior. Éste es de hojalata soldada, siendo los tubos de entrada y salida de cobre, soldados a la carcasa con estaño.

La otra parte actúa como tapa y es atravesada por el eje de la turbina.

Es interesante comentar el método empleado para reducir el rozamiento entre el eje de la turbina y sus apoyos sobre la carcasa. Sabemos que el coeficiente de rozamiento entre latón y acero es inferior al de acero contra acero. Por eso, aprovechando que las ruedas y poleas del Meccano tienen el buje de latón, fijamos mediante tornillos dos de estas piezas en el fondo y en la tapa de la carcasa, sirviendo de apoyos y rodamientos para el eje del rodete.

En el extremo de este eje fijamos una polea de grandes dimensiones también de Meccano. Cumple dos misiones de gran importancia:

- Transmisión del movimiento de giro a una polea de menores dimensiones solidaria a la máquina eléctrica: gran relación de transmisión.
- Actúa como volante de inercia regularizando el movimiento que podría presentar puntas de par entre un álabe y el siguiente.

La transmisión es, evidentemente, por correa, cumpliendo este cometido una goma elástica que une las poleas de la turbina y la máquina.

## 1.5 La Dinamo

Siempre que nos hemos referido al elemento productor de electricidad se ha utilizado el término máquina eléctrica o a lo sumo, dinamo. Este punto precisa alguna explicación más.

Disponer de un alternador quedaba fuera de nuestro alcance, tanto por la complicación que representaba alimentar el inductor como por los tamaños existentes, totalmente desproporcionados respecto a nuestra instalación.

Parecía más adecuado recurrir a una dinamo; sin embargo, éstas también son de un tamaño relativamente grande para la potencia hidráulica disponible. Entonces decidimos recurrir a una propiedad de las máquinas eléctricas con inductor por imán permanente: son reversibles.

En efecto, si hacemos girar un motor de corriente continua con un imán como inductor, en sus bornes aparece una diferencia de potencial proporcional a la velocidad de rotación del inducido. Esto es de gran interés para nuestro experimento, pues existen pequeños motores de poca inercia, muy indicados para ser accionados por la turbina.

Sin embargo, la intensidad que es capaz de producir este tipo de motor es muy pequeña. Así que mientras la tensión puede alcanzar valores de casi 3 V, la intensidad es del orden de mA, insuficientes para alimentar una simple bombilla de linterna.

A pesar de todo, creemos que esto no es ningún problema, ya que para nosotros es suficiente ver cómo aumenta o disminuye la tensión que aparece, pues sería un buen indicador para razonar lo que puede ocurrir en una instalación de potencia superior.

## 1.6 La instalación hidráulica

El objeto principal de estudio es el conjunto de conducciones, para hallar una disposición óptima que permita obtener un máximo de energía eléctrica.

Entre los tubos existentes en el mercado, nos decidimos por tubos rígidos de PVC, por dos razones principalmente:

- Su rigidez los hacía óptimos por la facilidad con que se podían montar y desmontar, no necesitándose elementos adicionales de soporte de la instalación.
- Existen todo tipo de accesorios del mismo material de dimensiones adecuadas, tales como los acoplamientos con reducción para cuando sea preciso pasar de un diámetro de tubo a otro.

Cuando, por ejemplo, deba haber un codo de 3/8 de pulgada uniendo dos tubos de 1/2 pulgada, es preciso seguir los siguientes pasos:

- Colocar a ambos lados del codo dos pequeños trozos de tubo de  $3/8$ .
- Unir estos dos trozos con los tubos de  $1/2$  pulgada a través de una reducción.

Este procedimiento no debería introducir grandes modificaciones en los resultados; tal vez, incorpore algo de ruido que será eliminado con el tratamiento estadístico de las medidas.

El depósito se construyó a partir de una garrafa de plástico (con volumen de 5 litros) a la que se le cortó la parte superior para permitir su llenado de forma fácil.

Asimismo se le practicó un orificio en la parte inferior donde se fijó un roscado por medio de tuercas a ambos lados de la pared del depósito. Para asegurar la estanqueidad se intercalaron juntas de goma entre tuerca y pared. A este tubo, con rosca de  $1/2$  pulgada, se le colocó un codo de  $1/2$  pulgada roscado por un lado y liso por el otro. Esto obliga a colocar una reducción cuando el tramo A deba ser de  $3/8$  de pulgada.

Una vez hecho todo esto, el depósito se coloca a la altura fijada de 2 m respecto a la turbina, que se halla en el suelo y se pueden realizar ya los experimentos, cosa que comentaremos más adelante.

En la figura 1.6.1, hacemos un esquema de los codos, tubos, reducciones y empalmes que vamos a emplear.

## 1.7 La Respuesta de Interés

Una vez realizado todo lo anterior, es preciso decidir cuál será la variable de respuesta, que será la que utilizaremos para realizar el análisis estadístico del proceso.

Como ya se ha comentado, la información de interés es la tensión que aparece en bornes del motor. Será muy simple medirla con un multímetro digital con escalado automático, esto es, que ajusta su escala de medida desde mV hasta un alcance de 500 V de forma automática.

Podía haber sido interesante para un experimento más completo haber dispuesto de un tacómetro o cuentarrevoluciones digital, con lo que hubiéramos tenido además información de la velocidad angular del rodete para poderla relacionar con la tensión producida. Sin embargo, esto hubiera complicado y encarecido el experimento; además, esta relación sería más importante considerarla en caso de que estuviéramos alimentando una carga, pues es conocido que cuando



por el devanado del inducido pasa una intensidad, aparece un par resistente que debería ser vencido por la turbina.

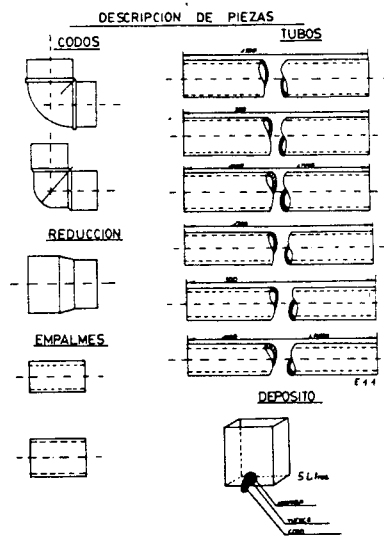


Figura 1.6.1 Descripción de piezas.

Resumiendo, la variable que más nos interesa medir es la tensión que aparece para cada disposición de las conducciones, y a tal efecto encaminaremos el experimento.

## 2. EL EXPERIMENTO

### 2.1 Método Operativo

En primer lugar debe montarse la instalación de tubos según el patrón que proporciona el diseño fraccional que se verá más adelante. Esta instalación deberá poner en comunicación el depósito y la turbina.

Cuando se tiene esto preparado, se procederá al llenado del depósito, asegurándose que el desagüe se encuentre cerrado con el tapón previsto a tal efecto.

En este momento uno de los experimentadores aplicará el multímetro a los bornes del motor para poder efectuar la lectura.

Cuando el primer experimentador se encuentre preparado, el otro debe retirar el tapón del desagüe, dando así paso al agua que desciende por la instalación hasta la turbina. Al incidir el chorro de agua sobre los álabes, se provoca el giro del rodete y éste arrastra el motor, pudiéndose entonces observar que aparece la diferencia de potencial deseada.

Al realizar el experimento se tomaron varias lecturas para cada disposición de la instalación (4 concretamente). Sin embargo, éstas no constituyen verdaderas réplicas, pues no contemplan la variabilidad debida al montaje de los tubos. Hubiera sido más adecuado proceder a montar cada vez la instalación por completo, con lo que se habría eliminado una fuente de variabilidad que podría haber sido importante.

Aún asumiendo este error, se considera que el experimento es bastante adecuado, siempre y cuando se sigan en su realización unas ciertas normas que garanticen que las condiciones entre unas lecturas y otras tengan la mayor similitud posible. Estas normas son el contenido del apartado siguiente.

## **2.2 Normas de Realización**

En primer lugar, para asegurar una carga constante de agua, antes de realizar una medida, debe tenerse el depósito lleno hasta una marca prefijada. Esto garantiza además que no haya variaciones entre llenados, o al menos se minimicen, por error o cambio del experimentador.

Junto a esto, es preciso proceder a la descarga de la instalación entre réplicas. La explicación es sencilla. Entre una y otra medida podría crearse vacío parcial en alguno de los tramos de la conducción, lo que provocaría diferencias entre unos vaciados y otros. Si antes de una nueva medida se descargan completamente los tubos, se consigue que las condiciones sean lo más parecidas posible entre observaciones. Este es un problema causado por el transitorio, ya que en funcionamiento permanente la turbina presenta un comportamiento correcto.

Finalmente, cabe señalar una serie de aspectos que deben ser considerados en el momento de realizar la lectura del polímetro digital.

Cuando se inicia el movimiento de la turbina se produce un salto brusco de tensión, producido por dos circunstancias:

- Aparece un transitorio en la tensión, debido al cambio de las condiciones eléctricas al iniciarse el movimiento de las espiras en el interior del campo magnético.
- El escalado automático del multímetro precisa de un tiempo de conexión que distorsiona la lectura. Por tanto, la lectura de la tensión no se produce inmediatamente. El valor correcto se alcanza durante el funcionamiento en régimen permanente de la turbina. Éste se produce cuando, siendo la carga hidráulica prácticamente constante, la turbina llega a su velocidad máxima. Durante un cierto tiempo podrá observarse que la tensión se mantendrá prácticamente constante. Éste es el instante en que se debe efectuar y anotar la lectura de la diferencia de potencial.

Con estas pequeñas normas, el experimento puede realizarse en condiciones adecuadas todas las veces que sea preciso, asegurándose que los resultados que se obtengan serán suficientemente correctos.

### 2.3 Diseño; Consideraciones

Como ya se ha comentado, realizar un diseño factorial completo para nuestro experimento, en el que hay 8 factores, precisaría de 256 experimentos elementales ( $2^8 = 256$ ).

Esto es inabordable en un primer estadio de la investigación, ya que no debemos consumir todo el presupuesto, en este caso el tiempo, en un gran número de experimentos que, muy probablemente, no serán necesarios, pues no todos los factores serán activos.

Por eso es siempre interesante plantear un diseño fraccional que nos permita, como mínimo, discernir los efectos principales. Esto nos guiaría en los siguientes pasos de la investigación, si fuera preciso.

El diseño que se plantea acomoda 8 factores en 16 experimentos, disminuyendo en un factor 16 el número total que deben realizarse. Se trata pues de un diseño:

$$\frac{2^8-4\text{IV}}$$

Una vez decidido el diseño, obtener la estructura de los experimentos no presenta dificultad. Podemos acudir a tablas, como las presentadas por Bisgaard (1988), o generarla nosotros mismos, bien siguiendo las indicaciones dadas en los apuntes publicados por el Departamento de Estadística e Investigación Operativa

de la ETSEIB (UPC), bien siguiendo lo expuesto por Box, Hunter y Hunter (1988).

Debemos indicar que no tenemos ninguna razón evidente por la que debiéramos bloquear. En efecto, con las normas dadas en el apartado anterior se eliminan las diferencias entre experimentadores, siendo los resultados que cabe esperar sensiblemente homogéneos.

Incluso la lectura del multímetro, punto conflictivo, queda resuelto si el valor leído es el que se produce durante el funcionamiento en régimen permanente, ya que simplemente basta constatar un período durante el que la tensión se mantiene constante y anotar este valor.

Otras causas típicas de efecto bloque no resultan aplicables. Por ejemplo, los materiales son uniformes y no se emplean de distintos tipos; el día en que se realiza la experiencia poco puede influir, pues se realizan todos los experimentos en un solo día ...

Por tanto, una vez confeccionada la tabla de diseño, (tabla 2.3.1) sólo resta aleatorizar el orden en que se realizarán los distintos ensayos, por un método tan simple como el sorteo. Esto se refleja en la tabla del diseño con un número entre paréntesis. Los experimentadores irán cambiando sus papeles aleatoriamente y como este hecho no debe reportar influencia ninguna sobre los resultados, no se tuvo en cuenta qué experimento se realizó con uno midiendo y otro llenando el depósito, o al revés.

Sólo queda, pues, reflejar la tabla del diseño, así como los resultados y la asignación de variables a los factores numerados del 1 al 8.

**Tabla 2.6.1**

Diseño fraccional y resultados por algoritmo de Yates ocho factores en 16 experimentos:  $2^{8-4}IV$

Exp	1	2	3	4	5	6	7	8	Y1	Y2	Y3	Y4	Ym
1(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.67	1.87	1.70	1.84	1.77
2(9)	+	-	-	-	+	-	+	+	1.81	1.79	1.80	1.82	1.81
3(10)	-	+	-	-	+	+	-	+	2.40	2.66	2.47	2.50	2.51
4(2)	+	+	-	-	-	+	+	-	1.82	1.80	1.80	1.74	1.79
5(11)	-	-	+	-	+	+	+	-	1.60	1.68	1.80	1.70	1.70
6(3)	+	-	+	-	-	+	-	+	1.76	1.80	1.90	1.91	1.84
7(4)	-	+	+	-	-	-	+	+	2.25	2.30	2.29	2.37	2.30
8(12)	+	+	+	-	+	-	-	-	1.90	2.07	2.06	2.20	2.06
9(13)	-	-	-	+	-	+	+	+	2.00	1.97	1.78	1.90	1.91
10(5)	+	-	-	+	+	+	-	-	1.38	1.40	1.50	1.31	1.40
11(6)	-	+	-	+	+	-	+	-	1.93	1.83	1.87	1.79	1.86
12(14)	+	+	-	+	-	-	-	+	2.79	2.66	2.40	2.50	2.59
13(7)	-	-	+	+	+	-	-	+	2.50	2.15	2.35	2.20	2.30
14(15)	+	-	+	+	-	-	+	-	1.83	1.89	1.70	1.74	1.79
15(16)	-	+	+	+	-	+	-	-	1.90	1.91	1.80	2.01	1.91
16(8)	+	+	+	+	+	+	+	+	2.64	2.36	2.60	2.50	2.53

$H_{TH}$	$D_A$	$D_B$	$D_C$	$L_D$	$DD$	$LB$	$C$
----------	-------	-------	-------	-------	------	------	-----

- 1 1 =  $-0.057 \pm 0.025 \Rightarrow$  (1)
  - 1 2 =  $0.377 \pm 0.025 \Rightarrow$  (2)      \*\*\*
  - 1 3 =  $0.154 \pm 0.025 \Rightarrow$  (12 + 35 + 48 + 67)      \*\*\*
  - 1 4 =  $0.099 \pm 0.025 \Rightarrow$  (3)      \*\*\*
  - 1 5 =  $0.060 \pm 0.025 \Rightarrow$  (13 + 25 + 47 + 68)
  - 1 6 =  $-0.087 \pm 0.025 \Rightarrow$  (23 + 15 + 46 + 78)      \*\*\*
  - 1 7 =  $0.030 \pm 0.025 \Rightarrow$  (5)
  - 1 8 =  $0.063 \pm 0.025 \Rightarrow$  (4)
  - 1 9 =  $0.138 \pm 0.025 \Rightarrow$  (14 + 28 + 37 + 56)      \*\*\*
  - 110 =  $-0.009 \pm 0.025 \Rightarrow$  (24 + 18 + 36 + 57)
  - 111 =  $0.440 \pm 0.025 \Rightarrow$  (8)      \*\*\*
  - 112 =  $0.093 \pm 0.025 \Rightarrow$  (34 + 17 + 26 + 58)      \*\*\*
  - 113 =  $-0.087 \pm 0.025 \Rightarrow$  (7)      \*\*\*
  - 114 =  $-0.112 \pm 0.025 \Rightarrow$  (6)      \*\*\*
  - 115 =  $-0.060 \pm 0.025 \Rightarrow$  (16 + 27 + 38 + 45)
- Media =  $2.003 \pm 0.012$   
 Generadores :5 = 123, 6 = 234, 7 = 134, 8 = 124

### 3. INTERPRETACIÓN. PRIMERAS CONCLUSIONES

Para aceptar que un efecto o una interacción son significativos cuando su valor es igual o superior a tres veces la desviación estandar de los efectos (nivel de confianza superior al 99.865%), debe partirse de la hipótesis que las interacciones de tercer orden y superior, con las que los efectos principales se hallan confundidos en la estructura de alias, no son significativas.

Esto supone un riesgo de error, pero normalmente será pequeño y podrá asumirse.

A partir de estas consideraciones, puede verse cuáles de los resultados obtenidos tienen significación real.

- $H_{TH}$   
se observa que no resulta importante la altura a la que se encuentra el tramo horizontal, lo que parece indicar que no tiene significación respecto a la altura total del salto.
- $D_A$   
es importante el diámetro más próximo a la salida del depósito; era de esperar que a mayor sección, el caudal sea mayor, con lo que puede lograrse una velocidad mayor en posteriores secciones más reducidas de la conducción. Al utilizar el diámetro mayor (+), se espera un aumento medio de 0.377 V.
- $D_B$   
por razones similares, el diámetro del tramo  $B$  influye positivamente, aunque menos, porque origina más pérdidas de carga. Se espera un incremento de casi 0.1 V.
- $D_C$   
no tiene significación, pues probablemente su efecto no pueda manifestarse dada la alta velocidad del líquido motivada por el resto de la instalación.
- $L_D$   
de forma similar, la pérdida de carga que pudiera originar el tramo horizontal  $D$  no es suficiente para que se aprecie una diferencia notable entre sus niveles + y -.
- $D_D$   
la influencia del diámetro  $D$  es negativa, esto es, en caso de estar presente (debe recordarse que su longitud puede ser 0 ó 1m), cuando su diámetro se encuentre a nivel + se espera una disminución de nivel en la respuesta de 0,112 V. La posible explicación consiste en que si dicho tramo  $D$  está

instalado, es conveniente que su diámetro sea lo menor posible. De esta forma se lograría un incremento considerable de la velocidad del fluido en el tramo final, justo antes de la entrada a la turbina. Este hecho es altamente deseable dada la similitud de la máquina con una turbina del tipo de acción.

- $L_B$   
si tenemos un tramo horizontal largo (+), las pérdidas de carga son tales que se observa una disminución de 0,087 V en la diferencia de potencial medida en los bornes del motor.
- $C$   
cuando los codos están a su nivel +, se tiene un aumento en la tensión de 0.440 V, lo que es lógico si se considera que los codos son pérdidas de carga singulares tanto mayores cuanto menor sea su diámetro.

Esta sería una primera interpretación, que debería ser revisada en posteriores análisis.

En efecto, quedan interacciones de segundo orden confundidas entre sí (debe recordarse que el diseño es de resolución IV). Estas confusiones han resultado significativas al nivel establecido. Por tanto, deberían revisarse las interpretaciones de los efectos principales que además resultasen estar interaccionando.

Por ejemplo:

$$- H_{TH} D_A + D_B L_D + D_C C + D_D L_B$$

$$- H_{TH} D_C + D_B L_B + D_A C + L_D D_D$$

$$- H_{TH} L_B + D_B D_C + L_D C + D_A D_D$$

Presentan efectos positivos.

$$- H_{TH} L_D + D_C D_D + L_B C + D_A D_B$$

Presentan en cambio efectos negativos.

Resulta difícil poder decir cuáles de estas interacciones confundidas son realmente significativas, o si por el contrario la significación la han alcanzado por efecto acumulativo. Esto requeriría aumentar el número de experimentos, cosa que se comentará en un apartado posterior.

A pesar de todo, un resumen de estas conclusiones preliminares podría ser:

- Diámetros gruesos en tramos de transporte permiten mayor caudal; más energía disponible.
- Suavizando las inflexiones, se producen menos pérdidas singulares.
- Tramos horizontales largos aumentan las pérdidas de carga.
- La sección del tramo final, el que se acopla a la turbina, debe ser menor que el resto, con lo que se aumenta la velocidad de entrada del líquido.

#### 4. POSIBILIDAD DE CONTINUAR EL EXPERIMENTO

El problema con el que nos encontramos en este punto del estudio es resolver las ambigüedades que se presentan entre interacciones de segundo orden.

Para poder separar las cuatro interacciones confundidas en una determinada estructura son necesarios cuatro nuevos experimentos (Box, Hunter y Hunter, 1988):

- Tres para separar las interacciones
- Uno más para poder evaluar el cambio en la medida global por los nuevos experimentos, realizados más tarde que los 16 iniciales.

Si quisiéramos separar por ejemplo las interacciones 14+28+37+56 que son las que tenían un efecto superior, sería necesario añadir los 4 experimentos de la tabla 4.1.

**Tabla 4.1**

Incorporación de nuevos experimentos para separar interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8
+	+	+	+	+	+	-	-
+	+	+	+	+	-	-	+
+	+	+	+	+	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+	+



En un estudio preliminar debe emplearse tan solo una parte del presupuesto o del tiempo disponible. Este estudio debe ser rentable, es decir, la relación tiempo dedicado frente a la información obtenida debe ser positiva.

En nuestro caso, una valoración aproximada de los tiempos empleados sería:

- *Preparación:* Construcción de la turbina y puesta a punto de la instalación  
20 horas
- *Primeros experimentos:* Diseño fraccional con 16 experiencias  
8 horas
- *Análisis preliminar de resultados:*  
10 horas
- *Experimentos posteriores:* Factorial completo si fuera necesario  
100 horas
- *Conclusiones finales:*  
15 horas

Vemos pues que el tiempo empleado en estos primeros experimentos y el análisis de resultados representa una pequeña fracción del tiempo total.

Con un gasto relativamente pequeño hemos logrado bastante información de un diseño bastante complicado.

## 5. CONCLUSIONES FINALES

Los objetivos perseguidos en esta práctica, ya indicados a lo largo de la misma, podrían ser de forma resumida:

- Plantear un proceso o un cierto problema de ingeniería, que reuniera unas características tales que lo convirtieran en sujeto de interés:
  - ★ Una cierta complicación
  - ★ Sentido de “realidad”
  - ★ Aspecto interesante.

Digamos que el problema escogido pone a prueba unas ciertas dosis de inventiva y habilidad, así como algunos de los conocimientos adquiridos en otras disciplinas diferentes de la estadística.

- Poner a prueba el diseño de experimentos como herramienta potente para hacer “hablar” a los procesos reales. Aquí entran en juego los conocimientos adquiridos en Estadística.
- Interpretar la información obtenida del diseño fraccional que se emplea. Esto es un problema tanto de sentido común como de conocimientos técnicos del proceso sometido a estudio.
- Lograr todo lo anterior de una forma fácil y rápida, con el mínimo gasto posible, para estar en disposición más adecuada, una vez que hemos sido orientados por los resultados de los análisis previos.

Digamos como conclusión que los objetivos se han logrado en gran medida. Con más tiempo se podría seguir investigando en la línea de separar las confusiones que puedan quedar aún a nivel de interacciones de segundo orden; hemos podido contrastar los resultados con los conocimientos previos que del problema teníamos, no observando en principio discrepancias ...

Ha sido, pues, un trabajo que satisface las perspectivas que de él se esperaban, siempre dentro de su relativamente restringido campo de aplicación, fundamentalmente académico.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Bisgaard, S.** (1988). “A Practical Aid for Experimenters”.
- [2] **Box, G.E.P., Hunter, W.G. y Hunter, J.S.** (1988). “Estadística para Investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos”. Ed. Reverté.
- [3] **Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Sección Técnicas Cuantitativas de Gestión; ETSEIB, UPC** (1990). “Apuntes para el seguimiento de la Asignatura ‘Estadística Teórica y Aplicada’”. CPDA.