

Capítulo 2

Montaje Experimental.

2.1. Descripción del Montaje Experimental.

Toda la realización de nuestro proyecto se ha realizado dentro del canal hidrodinámico, tanto la formación del resalto hidráulico como la visualización del flujo a través de un cilindro. En ambos experimentos, nos hemos ayudado de un láser para la medición de las velocidades. Este láser se basa en la técnica de anemometría láser Doppler, la cual, de forma no intrusiva mide tanto velocidades como tamaños de partículas.

En nuestro montaje, como se puede observar en la figura 2.1, tenemos por un lado el canal hidrodinámico, y por el otro lado el láser junto con todos los aparatos que le acompañan. Dicho canal es un circuito cerrado donde el agua va recirculando gracias a una bomba centrífuga unida a un variador de frecuencia que nos permite trabajar al régimen de giro deseado. La bomba impulsa al fluido hacia un depósito de unos $2m^3$ de capacidad, que tiene la misión de tranquilizar el agua. Entre la bomba y el depósito tenemos una válvula de paso, que se ha mantenido totalmente abierta.

El depósito de tranquilización tiene en su interior un filtro de partículas de unos $10cm$ de grosor para filtrar el agua y absorber las posibles turbulencias del agua impidiendo que se propaguen aguas abajo en el canal. Muy cerca del final del depósito hay un panel de nido de avispa que se utiliza para dirigir el agua y eliminar toda componente de velocidad que no sea longitudinal. La unión del depósito con el canal se realiza mediante una tobera convergente, previamente diseñada que dirige

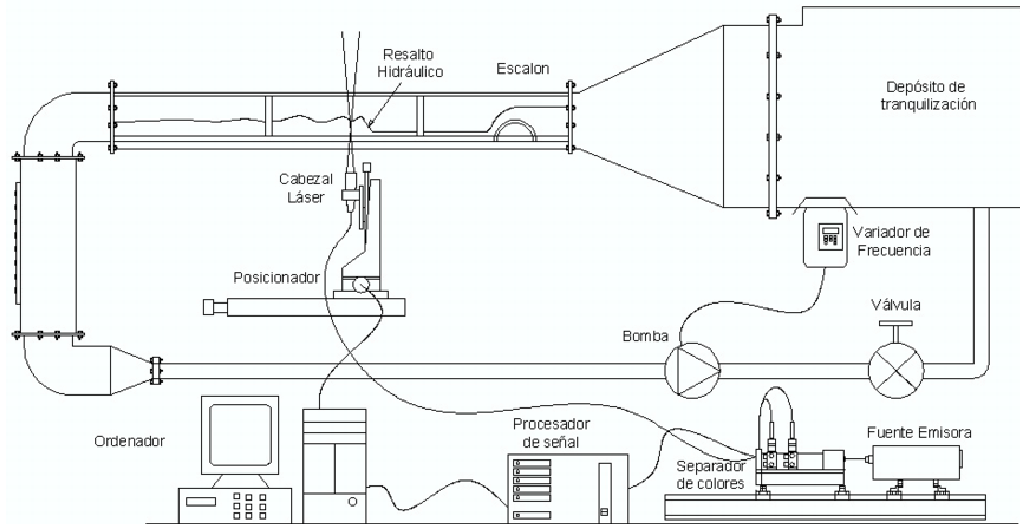


Figura 2.1: Esquema de nuestro montaje

al fluido consiguiendo un flujo uniforme a la entrada del canal. El canal tiene unas dimensiones de $3m$ de longitud con una sección de $30 \times 30 cm^2$ y las paredes de cristal.

El resalto hidráulico se ha conseguido colocando un obstáculo semicircular de $80mm$ de altura, fabricado con un tubo de pvc de $160mm$ de diámetro y cortándolo por la mitad. Al atravesar el obstáculo, el fluido se acelera consiguiendo justo después un régimen supercrítico, caracterizado porque el número de Froude es mayor que la unidad ($Fr > 1$). Posteriormente, el fluido se decelera bruscamente hasta obtener un régimen subcrítico ($Fr < 1$) formando el resalto hidráulico de unos $5cm$ de altura (valor que cambia según las condiciones en que se trabaja). Finalmente, el fluido tras salir del canal, vuelve a ser recirculado por la bomba hacia el depósito de tranquilización.

Como aspecto negativo del diseño del canal, hay que indicar que al tener dos barras de acero en las esquinas inferiores me impiden llegar con el láser cerca de las paredes y tomar medidas de velocidad en esa zona. Debido a esto, no se ha podido hacer un barrido completo de medidas de velocidades en todo el dominio fluido, dejando las zonas pegadas a la pared de unos $4cm$ en la que no hemos podido tomar medidas.

Para realizar todas las medidas de velocidad dentro del canal se ha utilizado un láser, el cual, va acompañado de un procesador de señal y un ordenador donde hemos instalado el programa *sizeware* para procesar los datos. Del cabezal láser, salen dos haces de luz cortándose en un pequeño volumen donde se produce la toma de datos. Dicho cabezal se encuentra en posición vertical y se mueve con gran precisión gracias a un posicionador colocado debajo del canal.

Para la toma de datos es necesario que el fluido lleve consigo una gran cantidad de partículas en suspensión. Estas partículas son las que el láser detecta y analiza. En un principio se usaron partículas calibradas para medición, pero como estas partículas son caras y el canal se tuvo que llenar y vaciar varias veces, se buscó una forma de conseguir partículas más baratas. La solución a este problema fue usar polvos de talco como partículas, previamente mezclados en agua con la batidora, consiguiendo un funcionamiento perfecto del láser con un coste económico prácticamente nulo.

Pasaremos a continuación a describir los diferentes aparatos utilizados en nuestro proyecto, explicando su funcionamiento y manejo con el fin de facilitar el aprendizaje a cualquier persona que en un futuro desee utilizar tanto el canal como el láser.

2.2. Medición de velocidades mediante la técnica LDA

La Anemometría Láser Doppler (LDA), inventada por Yeh y Cummins en 1964, es una moderna técnica para medir velocidades en el seno de fluidos de forma no intrusiva, con gran precisión y una alta resolución espacial. Se basa en el llamado efecto Doppler, el cual se produce al incidir una onda de cierta frecuencia sobre una partícula en movimiento. La reflexión de dicha onda sufre un desfase en frecuencia proporcional a la velocidad de la partícula. Considerando que φ es el ángulo entre los haces, $\mathbf{l}_i$ es la dirección en la que se emite el rayo desde la fuente fija (cabeza láser) y $\mathbf{u}_i$ es el vector velocidad de la partícula, la expresión que nos relaciona la velocidad de la partícula y el desfase en frecuencia de la onda reflejada es la siguiente [3]:

$$v_2 - v_1 = \frac{1}{\lambda} \mathbf{u}_i \cdot (\mathbf{l}_1 - \mathbf{l}_2) = \frac{|\mathbf{u}_i| 2 \sin(\varphi)}{\lambda} \quad (2.1)$$

Expresión que describe el fundamento físico del problema para la medición de velocidades aprovechando el efecto Doppler.

2.2.1. Equipamiento para la medición de velocidades mediante la técnica LDA

Sobre el montaje experimental ya descrito en el apartado 2.1, aquí se incluyen los diferentes dispositivos que acompañan al láser para generar los diferentes haces láser, tratar la señal recibida y controlar el punto en el que realizamos las mediciones.

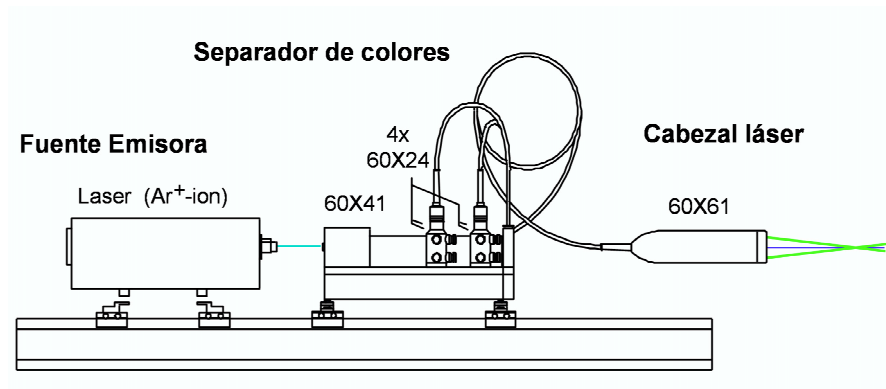


Figura 2.2: Fuente emisora y separador de colores sobre su apoyo.

El haz láser inicialmente generado en la fuente emisora entra en el separador de colores (ver fig. 2.3) donde se divide en parejas de haces de diferentes longitudes de onda. La primera pareja con una longitud de onda de $514,5nm$ de color verde, es la más energética y se utiliza para medir en una dirección (nuestro caso). La segunda, con longitud de onda de $488nm$ y de color azul, para medir en 2D, y finalmente la tercera, con $476nm$ de color morado que se utiliza si se desean medidas en 3 direcciones.

De cada pareja de rayos, uno se introduce en la célula de Bragg para desfasarlo en frecuencia, provocando diferencia de $40MHz$ necesario para identificar el signo de la velocidad de la partícula.

Posteriormente se enfocan cada uno de los haces obtenidos, con ayuda de un iluminador láser (y con no poca paciencia), al interior de una fibra óptica para ser conducidos a la cabeza láser, que es el dispositivo que finalmente emite los rayos al interior del recinto fluido. Tanto el separador de colores como la célula de Bragg y los iluminadores láser se encuentran en un mismo módulo (FiberFlow modelo 9060X0111 de Dantec) separado de la fuente que genera el láser, siendo necesario

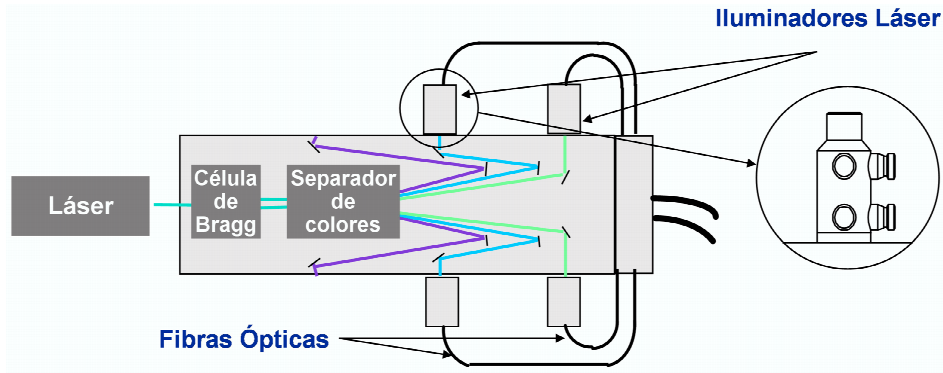


Figura 2.3: Esquema del separador de colores.

alinear la salida de dicha fuente con la entrada de este segundo módulo. A este proceso hay que añadirle el de enfoque de los dos rayos en sus respectivas fibras, realizándose esta tarea con ayuda del medidor de potencia láser, añadiendo aun más dificultad al proceso si cabe. La forma de actuar es ajustar los mandos del iluminador hasta que no se produce aumento de la potencia. En nuestro caso conseguimos una potencia de $10mW$ en cada uno de los haces de luz a la salida del cabezal láser. El proceso es tan engorroso que, hasta el punto de que en un fin de semana que bajaron las temperaturas unos 5 grados, se perdió la alineación y se tuvo que volver a alinear el desde el principio. Este proceso de alineación es de vital importancia pues si no se logra una potencia mínima a la salida de la cabeza láser, no se medirá de forma precisa y no se obtendrán buenos perfiles de velocidad.

Figura 2.4: Secuencia de lentes en la óptica de transmisión.

En la cabeza láser se produce el proceso de enfoque de los 2 haces en el punto de intersección, siendo éste, el punto de medida. El enfoque se produce a través de una serie de lentes, que es lo que se denomina óptica de transmisión y de la que hay que recordar varios parámetros para indicar su valor dentro del software. Estos parámetros son la distancia entre rayos D , y la distancia focal f , que es donde se genera en volumen de medida. (Ver fig. 2.4).

La configuración en la que trabajamos es la llamada *Backward-Scattered*, mediante la cual el dispositivo que recoge la luz reflejada se encuentra alojado en la misma cabeza láser que emite los rayos. Esta configuración tiene la ventaja frente a otras configuraciones, como la *forward-scattering*, de tener tanto transmisión como recepción en el mismo elemento facilitando el alineado de ambos sistemas, pues basta con una única operación. Como punto negativo está el hecho de que las pérdidas en potencia de las señales son mayores. Dicho sistema de recepción se encarga de enfocar la señal luminosa recibida dentro de una fibra óptica y se conduce a los fotomultiplicadores, donde se produce la conversión de la señal luminosa a eléctrica para su posterior tratamiento. Dicho tratamiento se realiza con ayuda del procesador de señal Multi PDA 58N80 de Dantec, conectado al pc para posteriormente tratar la señal con el programa *SIZEware* de Dantec.

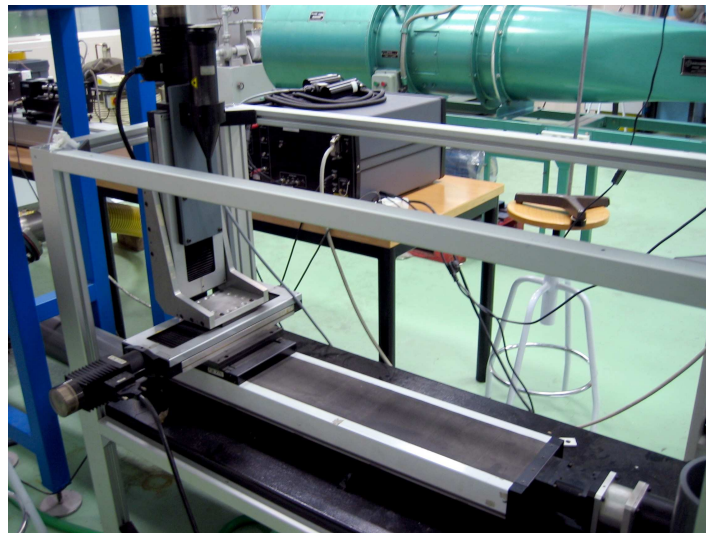


Figura 2.5: Posicionador para el control de la posición de la medida.

La posición del punto de medida se controla a través de un posicionador Newport modelo *MM – 2500*, como se muestra en la figura 2.5, el cual nos permite mover la cabeza láser en tres direcciones. nosotros, por motivos de espacio, hemos elegido una configuración vertical en la que en posicionador se encuentra debajo del canal y los

haces de luz entran por debajo. La precisión de este aparato es enorme lo que permite fijar la posición de medida con gran exactitud. Por contra, dicho posicionador no es compatible con el programa utilizado, por lo que el movimiento ha de hacerse manual con el controlador del posicionador y no quedara recogido en el programa.

2.2.2. Parámetros del programa *SIZEware*.

El tratamiento de la señal obtenida a la salida de los fotomultiplicadores se realiza en el procesador de señal. El control del procesador y la adquisición, procesado y representación de datos es lo que se hace con el programa. Éste, no sólo realiza mediciones de velocidades, sino también de tamaños de partículas. Dado que esta segunda opción no se ha usado, hemos tenido que desactivarla, porque de lo contrario daría un error por falta de hardware.

Al abrir el programa aparecen los siguientes módulos: *Configure*, *Set Up & Acquire*, *Processing*, *Presentation* y *Diameter analysis*. De todos ellos, el más importante y el único que se ha usado es "*Set Up & Acquire*" desde donde configuramos los principales parámetros y activamos la medición, siendo *Diameter analysis* para medidas de tamaño de partículas que no se han echo, y de los otros dos módulos restantes, el único que se ha usado es *Processing* para exportar los datos de medida a ficheros .dat y poder tratarlos y representarlos gráficamente con otros programas. La forma de exportar los datos a .dat es la siguiente:

1. Al hacer una medida, guardarla con un nombre cualquiera, por ejemplo: medida1.par
2. Abrir el archivo en FILE/OPEN/medida1
3. Procesar el archivo en PROCESS marcando Yes en Velocity y No en Moments.
4. Exportarlo en FILE/EXPORT escribiendo en Input el nombre del archivo que se desea exportar y en Output se escribe el nombre con el que se quiera guardar, p.e.: medida1.dat

Una vez explicada la forma de exportar los ficheros desde el programa, centrémonos en el principal módulo "*Set Up & Acquire*", dentro del cual aparecen las diferentes opciones que a continuación se indican:

1. *Files*, desde donde se abren y salvan los ficheros.

2. *Setup*, desde donde se configuran los diferentes parámetros del programa. Estos son:

Electronics. En la configuración electrónica se fija el número de componentes que se van a medir ($1D$). En el apartado de análisis de diámetros debemos desactivar esta opción (No). Hay que indicarle el tipo de tarjeta de comunicaciones que estamos usando (Interface board) y la dirección (Base Address), que en nuestro caso se trata de la tarjeta 58G130 y la dirección 310H, respectivamente. Todo lo demás lo hemos dejado como estaba, como en Burst detector mode donde se da un criterio para determinar el periodo de medida (Trigger on U_x /ext inhibit), y en Bragg Cell, donde se dice cual es la salida que esta conectada a la célula de Bragg (1 on, 2 off).

Transmitting optics setup. En los parámetros ópticos hay que indicarle la distancia focal, la separación entre rayos, etc... Estos parámetros son:

Wave lenght = $514,5nm$.

Gaussian beam diameter = 1, 4.

Beam collimator & Beam expander exp = 1 & 1.

Beam separation = $38mm$.

Lens focal lenght = $250mm$.

Receiving. Que se deja tal y como está.

Traverse. Aquí se fijan los diferentes puntos donde vamos a realizar la medida. A pesar de contar con un posicionador, éste no es compatible con el programa, por lo que el modo de posicionamiento será manual.

Bandwidths. Donde se indica el rango de velocidades a las que vamos a trabajar (debe elegirse el rango menor posible con nuestros valores de velocidad), así como la ganancia (Gain) que la hemos mantenido siempre alta. El resto de parámetros los hemos dejado como estaban.

3. *Acquire*, desde donde se fijan los diferentes parámetros para la validación y el control de adquisición de datos.

Validation. Entre los diferentes parámetros a fijar está el nivel de SNR (*Signal to Noise Ratio*) en el que controlamos la calidad de la señal recibida analizando la cantidad de ruido de dicha señal. Hemos trabajado con SNR's variables, siendo el más exigente el de +3Db, el cual hemos usado para las medidas de mayores velocidades.

Hvlt. Desde el cual, se controla la tensión aplicada a los fotomultiplicadores. Se ha dejado en $1096v$.

Run. Desde donde se indica al programa el modo de medida y los criterios de parada. El modo de medida escogido es el modo continuo, porque es el módulo en el que los datos se quedan almacenados. En cuanto al criterio de parada, se le ha dicho al programa que pare cuando llegue a 120seg (deadtime) o a 20000 valores (samples).

4. *Process*, desde el cual vuelvo al módulo *Processing*.

2.3. Corrección del movimiento vertical del láser

El láser, como ya se ha comentado antes, está formado por dos haces de luz que se cortan en un pequeño volumen, siendo éste, el punto de toma de medidas. Este haz de luz, al pasar de un medio a otro sufre una refracción (desvío del ángulo sobre la normal a la superficie) abriendo los haces y desplazando verticalmente el punto de medida, como se muestra en la figura 2.6.

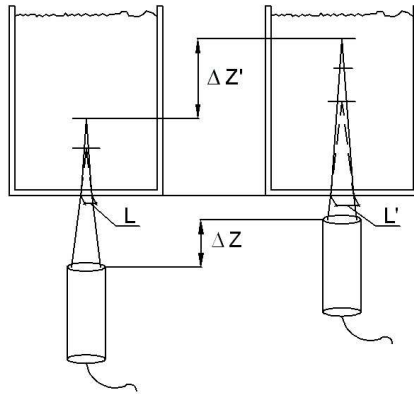


Figura 2.6: Al subir la cabeza del láser ΔZ , el punto de medida se desplaza $\Delta Z'$.

La relación entre un desplazamiento ΔZ en la cabeza del láser con el desplazamiento $\Delta Z'$ es una relación lineal, dado que si se desplaza el láser una cierta cantidad ΔZ , por un lado, el punto se desplaza la misma cantidad, y por otro lado, la distancia L de separación entre los dos haces al llegar al cristal aumenta, alejando así los haces y subiendo más aún el punto de intersección.

Esta corrección siempre ha de usarse para posicionar el láser en el eje z (la vertical) y no en el plano horizontal, ya que la refracción no afecta al movimiento en dicho plano, habiéndose calculado de forma teórica y experimental y obteniendo dos resultados prácticamente iguales, con un error menor de un 0.2%.

2.3.1. Cálculo Experimental.

El cálculo experimental se ha echo de forma muy sencilla. Con los haces de luz pegados a una regla que sirve de referencia y medida (como se muestra en la figura 2.7), hemos desplazado verticalmente el láser $100mm$ y se ha medido cuanto se ha desplazado el punto de intersección dentro del agua. Para ello se han realizado tres fotografías en cada una de las dos posiciones (A y B), y posteriormente, con ayuda de un editor de imágenes para conseguir mayor resolución, hemos medido el valor de la altura en cada una de las fotografías.

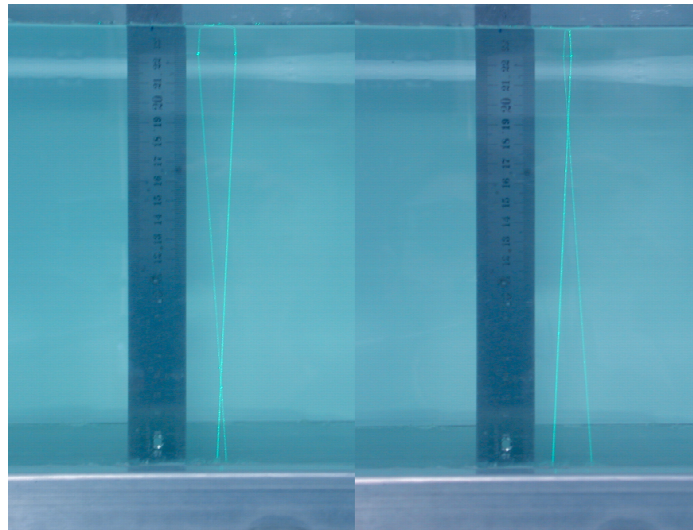


Figura 2.7: Al subir el láser $100mm$, el punto de medida sube $133,63mm$.

Los valores de altura para las dos posiciones son los siguientes:

Posición A : Se parte de una altura de $56,48mm$

Posición B : Se llega a un valor de la altura de $190,11mm$

Obteniendo así un avance de $190,11 - 56,48 = 133,63mm$ por $100mm$ de desplazamiento de la cabeza del láser, es decir, un coeficiente de corrección experimental de **1,3363**.

2.3.2. Cálculo Teórico.

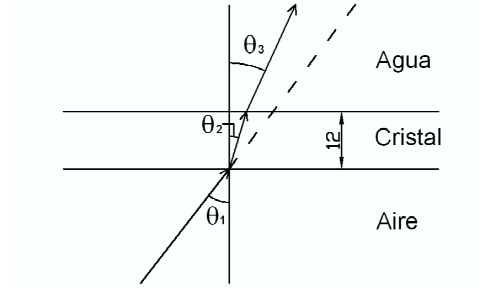


Figura 2.8: Modelo teórico del problema.

El cálculo teórico se ha echo sobre todo para contrastar el valor experimental. Para ello se ha resuelto el problema de la fig. 2.8 usando la ley de *Snell-Descartes* de la refracción de la luz al pasar de un medio a otro:

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \sin \Theta_1 &= n_2 \cdot \sin \Theta_2 \\ n_2 \cdot \sin \Theta_2 &= n_3 \cdot \sin \Theta_3 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Donde:

- Θ_1 es conocido por las características del láser, y vale $\Theta_1 = \arctan \frac{19}{250} = 4,346^\circ$
- n_1 es el índice de refracción del aire $n_1 = 1,003$
- n_2 es el índice de refracción de nuestro cristal, que para un cristal blindado con baja cantidad de plomo, vale $n_2 = 1,502$ [5]
- n_3 es el índice de refracción del agua, que para una $\lambda = 514,5nm$ y una $T = 18^\circ C$, vale $n_3 = 1,3375$ [6]

Con Estos valores, resolviendo la ecuación de *Snell-Descartes* se obtienen los valores de $\Theta_2 = 2,896^\circ$ y $\Theta_3 = 3,25^\circ$. Posteriormente, una vez tenemos todos los valores de los ángulos de salida, por trigonometría obtenemos un coeficiente de corrección teórico de **1,3384**, que se diferencian en menos de un 0,2%. Con lo que queda garantizado el valor obtenido experimentalmente. Finalmente, como valor usado se ha escogido **1,337**, siendo un valor intermedio entre el teórico y el experimental.

2.4. Variador de Frecuencia.

El variador de frecuencia va conectado al motor de la bomba, para controlarlo y así poder variar la velocidad de giro de la bomba. Esto lo consigue cogiendo la señal de la red eléctrica de $50Hz$ y la altera para conseguir la frecuencia deseada de giro en la bomba (ver fig.2.9). Desde que se empezaron los experimentos, el motor de la bomba tenía los polos invertidos, con lo que la bomba giraba en sentido inverso, disminuyendo la fuerza de bombeo y aumentando la turbulencia y las fluctuaciones. De este problema nos dimos cuenta tras acabar el barrido del campo de velocidades en la zona subcrítica y supercrítica en el experimento del resalto hidráulico, con lo que decidimos mantener estos datos e incluirlos en el proyecto, a pesar de tener mayores fluctuaciones que cuando la bomba trabajaba en sentido de giro de diseño. Este hecho se pudo apreciar perfectamente al hacer funcionar la bomba en los dos sentidos. Cuando la bomba trabajaba en sentido opuesto al de diseño, el resalto no era estable y no se mantenía en una posición fija, mientras que cuando trabajaba correctamente, disminuían notablemente las fluctuaciones, estabilizándose y manteniendo el resalto fijo en una posición.



Figura 2.9: Variador de frecuencia T-VERTER modelo NDOP-02 de $5,5kw$

Tras darnos cuenta de esto, para variar el sentido de giro de la bomba y ponerlo a girar correctamente, bien, se cambiaban los polos del motor y se colocaban correctamente, o bien, en el mismo variador se cambiaba el sentido de giro pulsando la tecla *rev*. Ésta última elección fue la que se eligió, dado que el maestro de taller no nos permitió tocar el motor de la bomba.

El variador se tuvo que configurar totalmente dado que estaba por defecto, que era para una frecuencia de la red de $60Hz$. El manejo del mismo es sencillo y sólo destacamos las funciones más importantes. Estas son:

- Fun 1: Donde se configura el tiempo de aceleración. Nosotros tomamos un tiempo de $100seg$ para que fuese un arranque suave.
- Fun 2: Donde se configura el tiempo de deceleración. También escogimos $100seg$.
- Fun 51: Para escoger la forma de ver en el display la velocidad de la bomba, bien en rpm o en Hz .