

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER DE CUATRO SENSORES EN FLUJO PERMANENTE.

Delahaye, Mariana y Lopez, Diego.

Dpto. de Ingeniería Civil, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan

RESUMEN

Este trabajo consistió en realizar un estudio de sensibilidad del velocímetro acústico de 4 sensores marca NORTEK modelo Vectrino cuyo funcionamiento se basa en el principio del efecto Doppler. El programa de ensayos consistió en cambiar el valor de variables como la frecuencia del sonido emitido (100Hz, 50Hz y 25 Hz), el rango de velocidades (± 0.3 m/s y ± 1 m/s), la longitud de onda (1.2mm, 1.8mm y 2.4mm) y su tamaño de volumen de control asociado (1.9mm; 5.5mm y 9.5mm) dejando constantes los parámetros de temperatura y de salinidad del agua. Estos ensayos se realizaron en condiciones de flujo permanente en un canal rectangular revestido con hormigón y pared de vidrio de 70cm de ancho de fondo y para un tirante de 22.5cm que corresponde a un caudal de 27,36l/s. Se midió la velocidad puntual del flujo para tres posiciones distintas en una vertical al fondo del canal ubicado al centro de la sección transversal al flujo. El análisis de los resultados concluyó que la frecuencia de 25Hz y el rango de velocidad de $\pm 0,3$ m/s presenta las menores desviaciones de las componentes de las velocidades V_x , V_y , V_z respecto a sus valores medios de todas las combinaciones posibles entre variables ensayadas.

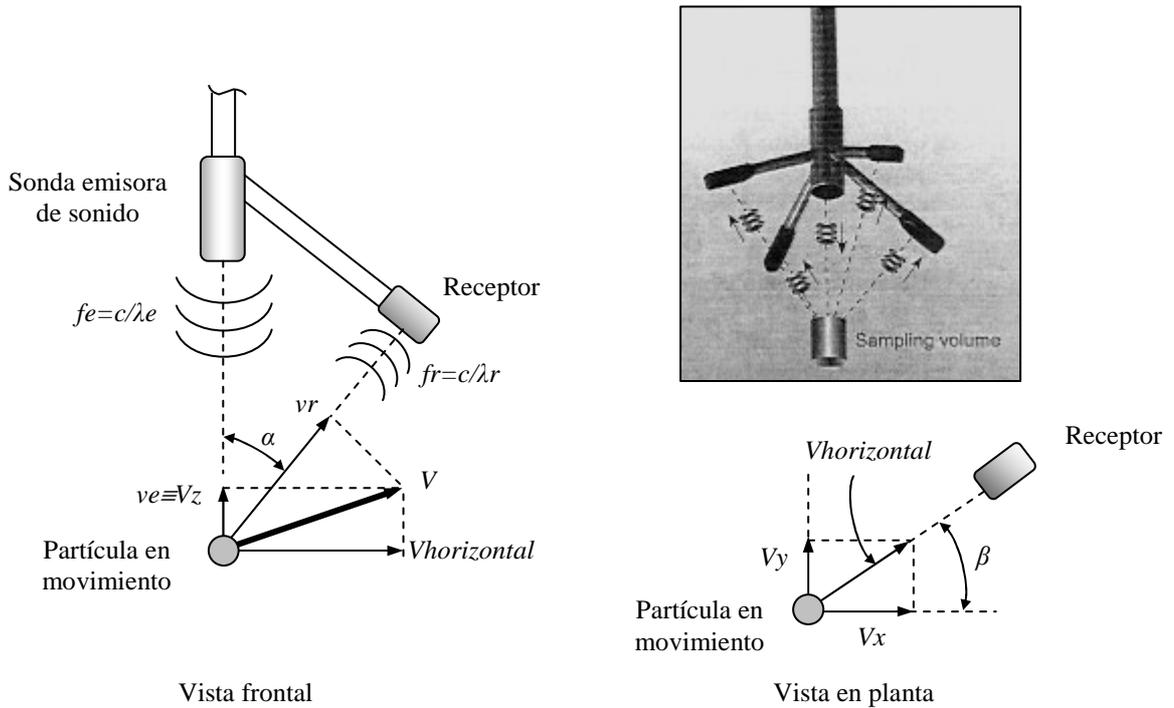
OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo consistió en realizar un estudio de sensibilidad del equipo (modelo Vectrino de 4 sensores ID 7333, hardware ID 0269, Firmware versión 1.27 con puerto RS232, conectores 12 pin IP68). Para el análisis de sensibilidad se seleccionaron como variables a la frecuencia, el rango de velocidades, la longitud de onda y el tamaño del volumen de control asociado; dejando constantes parámetros de temperatura, salinidad del líquido utilizado. Este ensayo se realizó para condiciones de flujo permanente en un canal rectangular revestido con hormigón y pared de vidrio. Se midió la velocidad puntual del flujo para tres posiciones distintas en una vertical al fondo del canal ubicado al centro de la sección transversal al flujo.

Funcionamiento del Vectrino.

El aparato analizado, provisto por el Departamento de Ingeniería Civil a través del Programa de Modernización de Equipamiento PME-2003, es un sensor ADV (Acoustic Doppler Velocimeters) modelo VECTRINO de 4 sensores diseñado y construido por NORTEK, cuya función específica es la de medir la velocidad de un flujo en tres dimensiones, es decir, que se obtiene una magnitud de sus tres componentes (V_x , V_y y V_z) y de esta forma poder reconstruir para el punto seleccionado el vector velocidad con dirección, magnitud, sentido y punto de origen. El sensor

utiliza el Efecto Doppler (1842 por el físico austriaco Christian Doppler) que consiste en establecer una relación de dependencia entre la frecuencia del sonido y la velocidad con la que se mueva el emisor, el receptor, o ambos.



Como se muestra en la figura, la sonda emite un sonido con una frecuencia f_e , y con longitud de onda $\lambda_e = \frac{c}{f_e}$, siendo

c la velocidad del sonido en el agua, estas ondas así emitidas chocan con las partículas del fluido que tienen una velocidad V , y finalmente la onda reflejada en la partícula es captada por el receptor, luego tenemos:

Frecuencia del sonido vista desde el objeto en movimiento (emisor en reposo)

$$f_s = \frac{c + v_e}{\lambda} = \left(\frac{c + v_e}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{c}{c} \right) = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{c + v_e}{c} \Rightarrow f_s = f_e \cdot \left(\frac{c + v_e}{c} \right)$$

Frecuencia del sonido vista desde el receptor (objeto en movimiento).

$$f_r = f_s \cdot \left(\frac{c}{c - v_r} \right) = f_e \cdot \left(\frac{c + v_e}{c} \right) \cdot \left(\frac{c}{c - v_r} \right) \Rightarrow f_r = f_e \cdot \left(\frac{c + v_e}{c - v_r} \right) \quad (v_r \ll c)$$

Y la Frecuencia Doppler será:

$$f_D = f_r - f_e \Rightarrow f_D = \left[f_e \cdot \left(\frac{c + v_e}{c - v_r} \right) \right] - f_e \Rightarrow f_D = \frac{f_e}{c} (v_e + v_r)$$

Luego expresamos éstas velocidades v_e y v_r en las componentes del vector velocidad del fluido

$$f_D = \frac{f_e}{c} \cdot [v_x \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha + v_y \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha + v_z \cdot (\cos \alpha + 1)]$$

Planteando tres ecuaciones de Frecuencia Doppler diferentes, obtenemos las 3 incógnitas. Es por esta razón la existencia de tres receptores. El cuarto receptor sirve principalmente para eliminar ruido en el sonido ya que la Frecuencia Doppler esta afectada por frecuencias parásitas que puedan aparecer.

Variables del Vectrino.

Las variables que pueden ajustarse mediante el programa provisto con el aparato son:

- Número de datos a recolectar: Se puede fijar seleccionando la cantidad de datos necesarios fijada por el usuario o fijando el tiempo destinado a la recolección de los datos.
- Longitud de onda: el usuario puede fijar la longitud de onda con la que desea trabajar.
- Volumen de control (tipo cilíndrico, posicionado a 0,05m de la sonda emisor) su tamaño está relacionado con la longitud de onda elegida, el diámetro es estándar de 0,006m, y puede cambiarse la altura del cilindro.
- Nivel de potencia: referida a la cantidad de energía acústica emite el aparato en el agua.
- Corrección por salinidad: se puede utilizar una medida estándar (agua) o puede cambiarse ésta según el tipo de fluido con que se trabaje.
- Velocidad del sonido: se puede utilizar una medida estándar (agua) o puede cambiarse según defina el usuario.
- Recibir señal: puede seleccionarse si se desea recibir señal del Vectrino, de otro aparato, o de más de un Vectrino.

Las órdenes que podemos pedirle al aparato son:

- La señal, para verificar que este recibiendo la señal de los cuatro receptores simultáneamente (esto se muestra en forma gráfica).
- La distancia al fondo, que es una medida que se presenta en forma grafica y está relacionado al tiempo que tardan las ondas emitidas en llegar al fondo, reflejarse en la superficie del fondo y llegar a los 4 receptores.
- La recolección de datos, que permite definir la forma en que se van a almacenar los datos de las variables seleccionadas en el ensayo.

Manejo de datos.

El software Vectrino crea archivos binarios, los que pueden ser convertidos a archivos de formato ASCII, usando el software Vectrino.

Los archivos que podemos pedirle son:

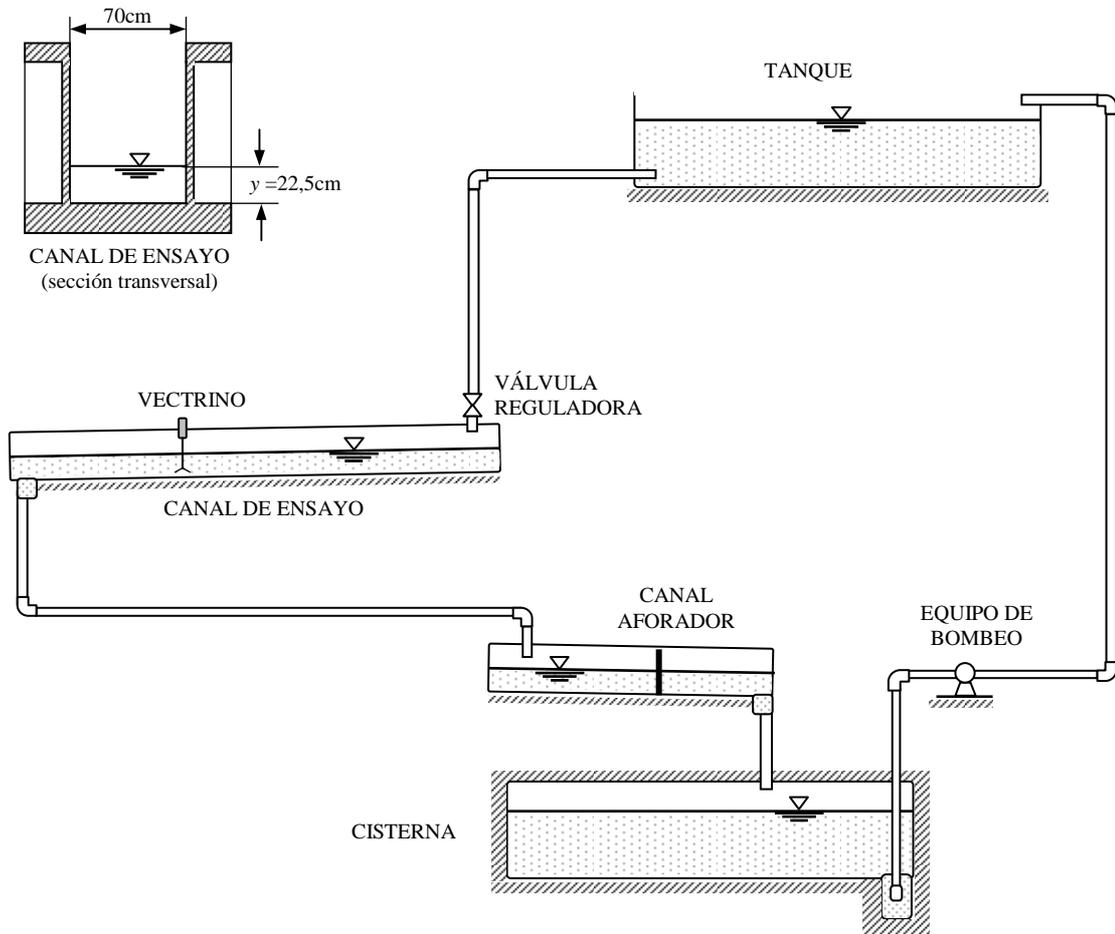
- El archivo *.hdr que es una tabla. Éste archivo contiene el formato detallado de los datos de todos los otros archivos.
- Los archivos *.dat, contienen los datos de velocidad y presión.
- Los archivos *.sen, contienen datos del sistema como por ejemplo el tiempo/fecha, inclinación, temperatura, voltaje de la batería, entre otros. Estos datos son muestreados una vez por segundo.

Los archivos ASCII son fáciles de importar en la mayoría de hojas de cálculo y programas de análisis de datos. NORTEK recomienda el uso de un programa desarrollado especialmente para el análisis de datos de turbulencia. El programa se llama ExploreV, que esta libre en internet.

Ensayo propiamente dicho.

Para la realización del ensayo, primero se colocó en régimen al canal de ensayo del laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería (IDHI). Para ello se puso en funcionamiento una bomba centrífuga de 100 l/s disponible en el subsuelo del laboratorio y se realizó la derivación correspondiente de 27,36 l/s al canal de ensayos.

En forma esquemática podemos ver el circuito del agua de dicho Instituto:



Equipo de Bombeo

Esquema de circuito de agua

Canal Aforador



Vertedero Rectangular

Para medir este caudal utilizamos un aforador de paredes delgadas donde tomamos la altura de la cresta con la ayuda de un limnómetro ubicado junto a él. Luego reemplazamos esta lectura en la siguiente ecuación para obtener el caudal:

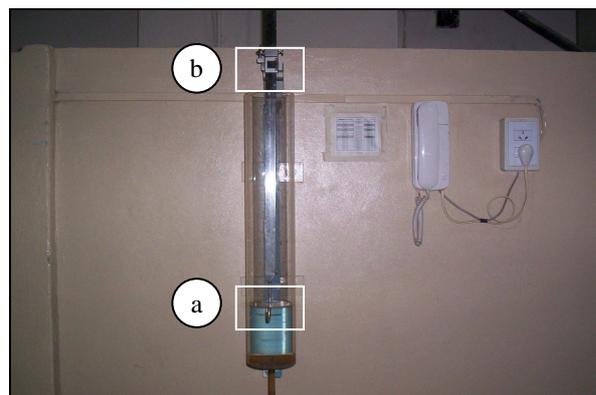
$$Q = 1,5498 \cdot H^{3/2}$$

Donde Q : es el caudal dado en $[m^3/s.]$ y H (altura de la cresta en $[m]$) es igual a la lectura del limnómetro menos 0,026 El Limnómetro está graduado en milímetros. Por razones de tiempo, tomamos dos medida del Limnómetro, una de 93,3mm para las condiciones de posición 0,039m, frecuencia 50Hz, rango de velocidades 0,3m/s, longitud de onda 1,2 hasta posición 0,039m, frecuencia 25Hz, rango de velocidades 1m/s, longitud de onda 2,4. El resto fue para medida del Limnómetro de 93,8mm.



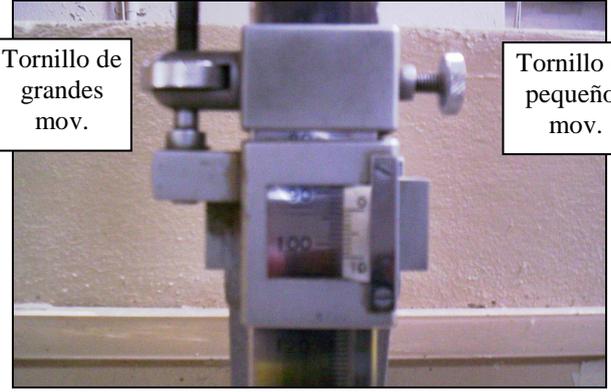
Sótano del laboratorio (IDIH)

Limnómetro
(vista frontal)





a- Punta de garfio

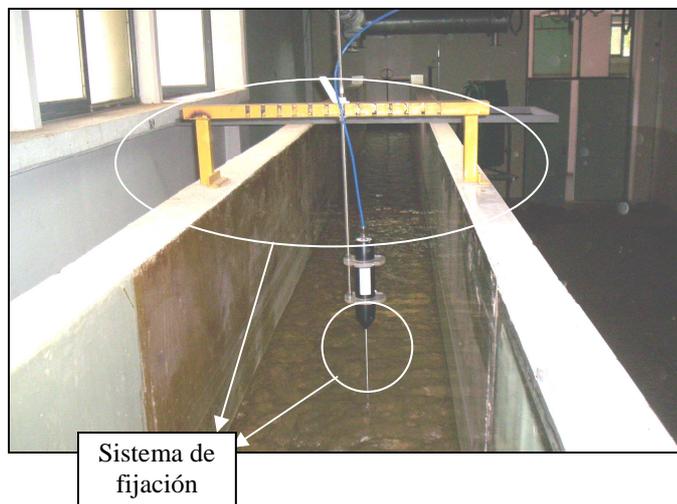


b- Regla metálica graduada



Otorgado este caudal, abrimos o cerramos la válvula de entrada que tiene el canal y definimos así el caudal de ensayo (como se muestra en la foto anterior).

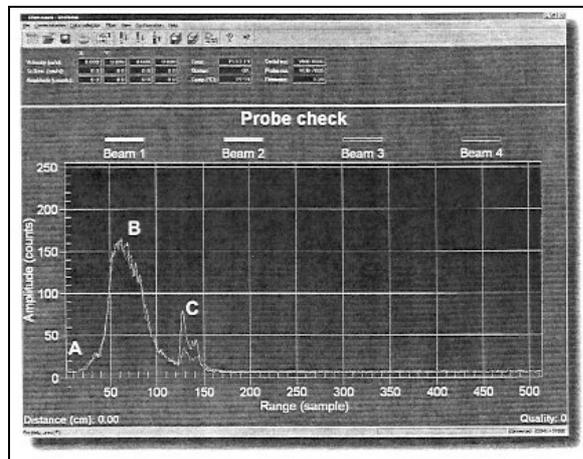
Una vez que obtenemos el caudal de ensayo, es decir, la lectura del limnómetro correcta, colocamos el aparato en el canal rectangular de paredes de vidrio, fijándolo en varios sentidos para impedir el movimiento del aparato o cualquier tipo de vibración posible que pueda provocar el fluido ya que esto produciría “ruido extra” en las mediciones, y por supuesto, una recolección de datos incorrecta.



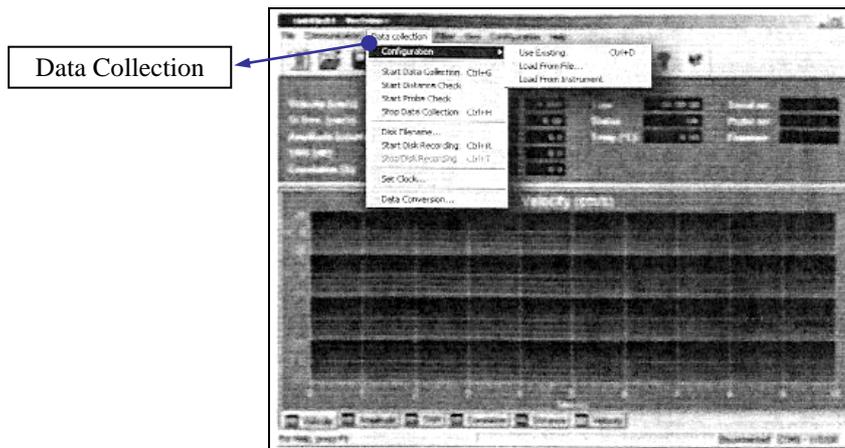
El sistema de fijación consiste en dos medias abrazaderas de acrílico unidas por dos tornillos cada una. Éstas a su vez se fijan al tornillo sin fin, el cual se atornilla a un parante ubicado en la parte superior de las paredes del canal.

Después conectamos el aparato al puerto USB de la computadora para que capture el Vetrino. Cuando ya tiene señal, abre automáticamente el programa (generalmente), caso contrario debemos verificar la conexión o cambiar de puerto hasta que abra el programa.

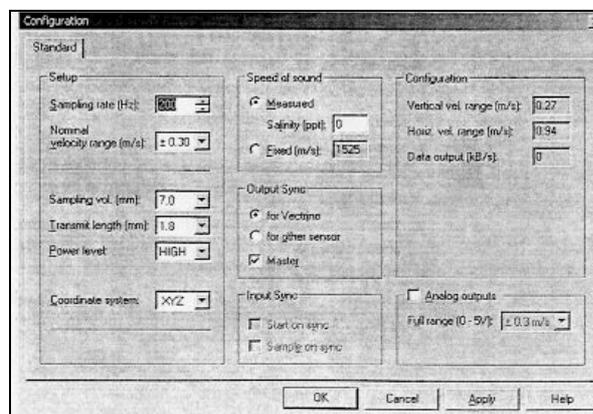
Luego debemos verificar con el programa que se reciba las señales de los cuatro receptores:



Seguido este procedimiento, podemos realizar dos tareas, verificar la distancia a la que se encuentra el Vetrino, o comenzar la recolección de datos como vemos a continuación:



Si queremos recolectar datos debemos previamente configurar el aparato con las variables deseadas (dichas anteriormente).

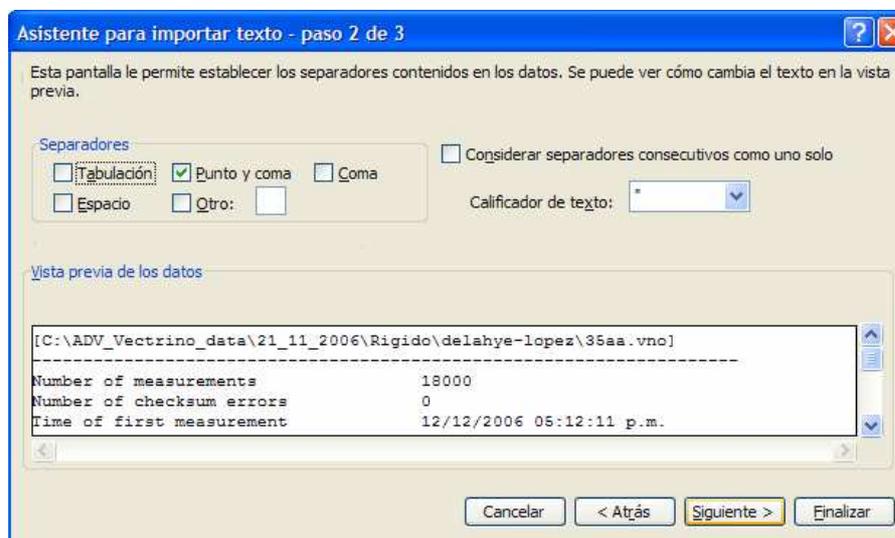
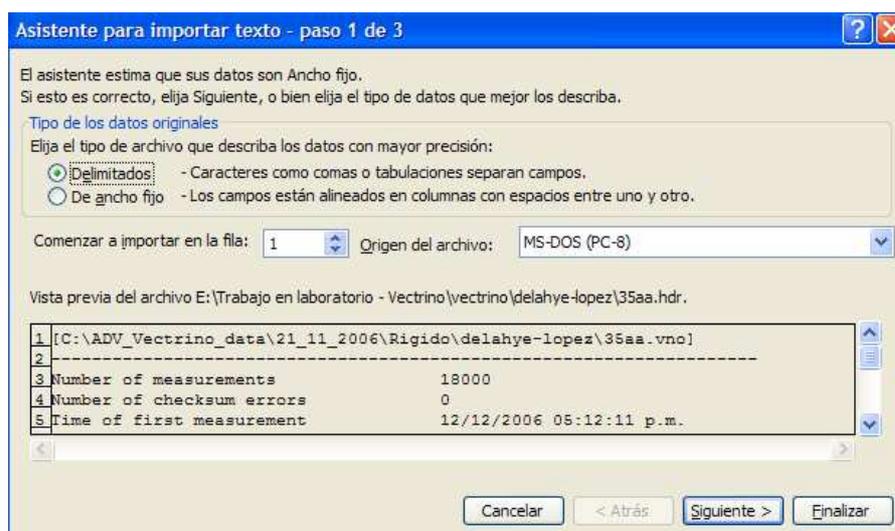


Para que no haya tanta interferencia del ruido en la señal captada, controlamos que la señal SNR(signal-to-noise-ratio) esté por encima del valor 20 dB.

Conviene esparcir partículas finas en el fluido para mejorar la captación del sonido emitido por la sonda del aparato y captada por los receptores del mismo.

Análisis de datos recolectados

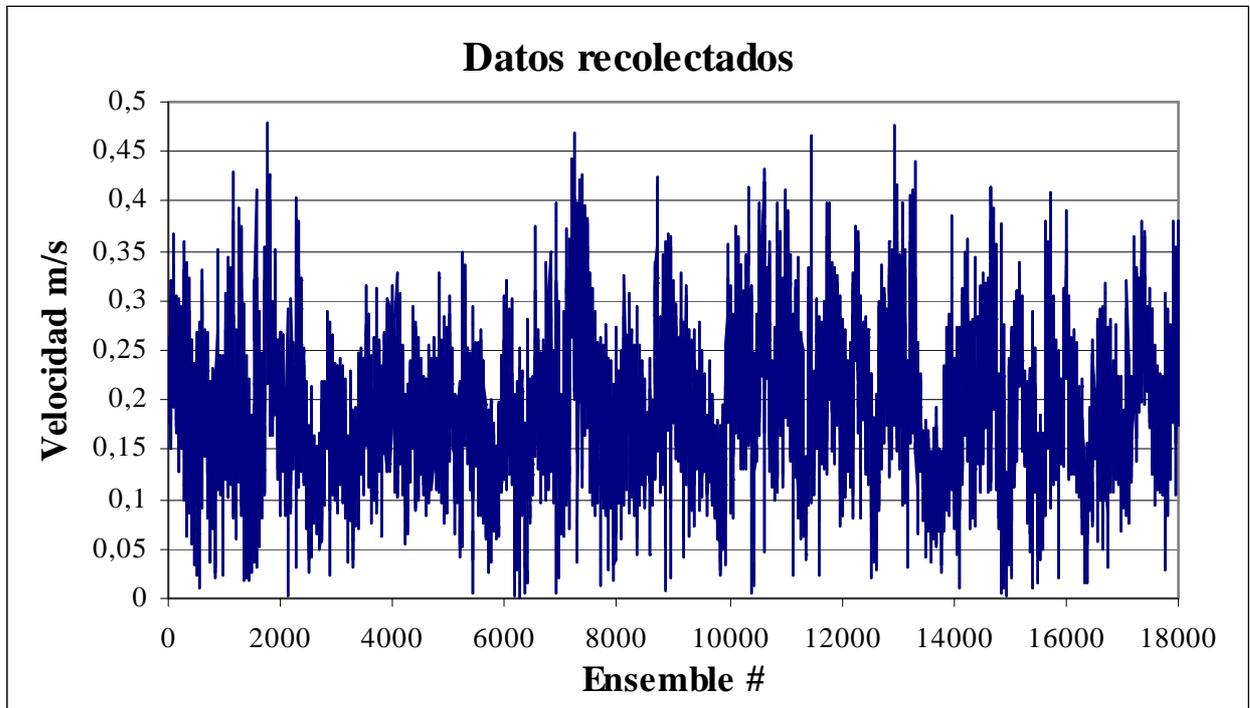
Como ya dijimos anteriormente, de los archivos que genera el programa, utilizamos los *.dat. Éstos archivos los abrimos desde Excel convirtiéndolos en una planilla de cálculo, colocando la opción “Delimitado” y luego el separador “Punto y coma”.



A esta planilla de cálculo le damos la siguiente forma, en donde en la margen superior izquierda, tenemos los valores de las variables que utilizamos en los ensayos, que son: rango de velocidades, frecuencia, longitud onda, volúmen de muestra, para cada posición. Seguidamente, calculamos los promedios (x_{med}), desviaciones estándar (σ) y varianza (v) para las 18000 muestras registradas por el aparato para cada punto y cada condición de ensayo.

Un ejemplo de esta tabla se muestra a continuación junto con su gráfica:

Rango de velocidades =	0,3 m/s																
Frecuencia =	100 Hz																
Longitud onda	1,2 mm																
Volumen muestra	1,9 mm																
Posicion=	0,1792 m desde el fondo (posicion del sensor)																
Average	0,191	0,010	0,007	0,004	126,002	136,306	149,637	148,120	20,266	21,711	23,429	24,257	91,548	92,132	92,163	92,112	
Stdev	0,064	0,059	0,037	0,038	23,663	24,813	18,654	18,670	1,705	1,652	1,135	1,153	8,027	8,006	8,034	7,927	
Var	0,004	0,004	0,001	0,001	559,945	615,698	347,960	348,554	2,907	2,729	1,289	1,328	64,427	64,091	64,541	62,833	
Amplitude																	
SNR db																	
Correlation %																	
# Ensemble	Status code	Vx m/s	Vy m/s	Vz1 m/s	Vz2 m/s	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4
1	100011	0,2445	0,082	0,0029	0,0137	108	126	151	152	19,1	21,2	23,6	24,6	79	97	96	91
2	100011	0,2363	0,0949	0,0097	0,0163	132	84	164	133	20,8	17,7	24,3	23,4	89	83	96	87
3	100011	0,2572	0,0513	0,0106	0,0149	160	151	141	135	22,5	22,8	23	23,5	98	98	97	95
4	100011	0,236	0,0327	0,0121	0,0086	137	127	151	133	21,2	21,2	23,6	23,4	97	96	92	99
5	100011	0,2603	0,0456	0,0109	0,0013	127	127	136	160	20,5	21,2	22,7	25	96	82	95	94
6	100011	0,2352	0,0937	-0,0031	-0,0014	100	150	107	139	18,4	22,7	20,6	23,8	89	95	95	97
7	100011	0,2588	0,0947	-0,0222	-0,0101	122	154	133	156	20,1	22,9	22,5	24,8	88	94	86	92
8	100011	0,1961	0,0919	-0,0218	-0,0338	97	146	149	154	18,2	22,5	23,5	24,7	95	96	92	81
9	100011	0,1892	0,0559	0,0001	-0,0131	120	129	167	141	20	21,4	24,5	23,9	88	90	93	86
10	100011	0,2372	0,1201	-0,0005	-0,0094	110	123	132	162	19,2	21	22,4	25,1	74	83	91	91
11	100011	0,2067	0,1547	-0,0022	-0,0145	109	132	145	156	19,2	21,6	23,2	24,8	86	83	83	98
12	100011	0,1925	0,1242	-0,0166	-0,014	159	145	143	147	22,4	22,4	23,1	24,3	97	87	94	96
13	100011	0,2044	0,1115	-0,0183	-0,0198	145	138	153	170	21,6	22	23,7	25,5	97	97	99	97
14	100011	0,1775	0,0945	-0,0132	-0,0251	147	111	172	161	21,8	20,1	24,7	25,1	98	96	86	91
15	100011	0,1963	0,0662	-0,0014	0,0101	129	150	129	162	20,6	22,7	22,2	25,1	83	91	92	80
16	100011	0,233	0,0929	0,0056	0,0112	102	148	132	151	18,6	22,6	22,4	24,5	74	96	93	90
17	100011	0,2468	0,1186	-0,0012	0,007	68	118	156	132	15,1	20,6	23,9	23,3	59	99	95	98
18	100011	0,2619	0,0759	-0,0046	0,0043	127	113	148	154	20,5	20,2	23,4	24,7	95	94	91	95
19	100011	0,2366	0,0472	-0,0032	-0,0013	107	136	155	184	19	21,8	23,8	26,2	91	95	90	99
20	100011	0,2422	0,0228	0,0013	-0,0102	127	96	177	169	20,5	18,8	25	25,5	95	78	99	87
21	100011	0,2364	0,0413	-0,0018	-0,008	119	105	135	147	19,9	19,6	22,6	24,3	97	89	96	93
22	100011	0,2366	0,065	-0,0048	-0,0058	100	98	163	162	18,4	19	24,2	25,1	87	87	98	99
23	100011	0,2301	0,0675	0,0005	-0,018	135	116	149	160	21	20,5	23,5	25	98	95	88	97
24	100011	0,2216	0,074	-0,0039	-0,0115	132	98	147	171	20,8	19	23,3	25,6	92	79	90	84
25	100011	0,206	0,0409	0,0046	-0,0006	158	105	156	139	22,4	19,6	23,9	23,8	95	91	94	94
26	100011	0,2289	0,0335	0,0025	0,0026	141	129	138	132	21,4	21,4	22,8	23,3	92	87	96	98
27	100011	0,2398	0,1061	0,0125	0,0045	111	117	146	146	19,3	20,5	23,3	24,2	90	98	94	95
28	100011	0,2295	0,1016	0,0045	0,0033	143	106	111	145	21,5	19,7	20,9	24,1	94	97	97	97
29	100011	0,2147	0,1102	0,0012	-0,002	123	113	137	109	20,2	20,2	22,7	21,7	95	94	95	92
30	100011	0,1941	0,1047	-0,0103	-0,005	129	84	145	172	20,6	17,7	23,2	25,6	96	95	97	90
31	100011	0,2273	0,0996	-0,0027	-0,0006	144	137	148	176	21,6	21,9	23,4	25,8	90	98	59	99
32	100011	0,2595	0,0981	-0,0127	-0,015	151	143	150	126	22	22,3	23,5	22,9	96	94	78	91



La designación colocada en la planilla de cálculo la obtenemos del archivo *.hdr. Además este archivo también muestra entre las variables colocadas para cada ensayo, la transformación matricial (para realizar programación específica), distancia, amplitud del ruido, correlación del ruido, temperatura y velocidad del sonido:

[C:\ADV_Vectrino_data\21_11_2006\Rigido\delahye-lopez\35aa.vno]

```

-----
Number of measurements      18000
Number of checksum errors   0
Time of first measurement   12/12/2006 05:12:11 p.m.
Time of last measurement   12/12/2006 05:15:11 p.m.
User setup
Sampling rate              100 Hz
Nominal velocity range     0.30 m/s
Transmit length            1.2 mm
Sampling volume            1.9 mm
Output sync                VECTRINO
Output sync                MASTER
Analog output              DISABLED
Velocity scaling           0.1 mm
Powerlevel                 HIGH-
Coordinate system          XYZ
Sound speed                MEASURED
Salinity                   0.0 ppt
Number of beams            4
Software version           1.08
System1                    4
System2                    50
System3                    1
System4                    445
System5                    512
System9                    1218
System10                   65
System11                   0
System12                   0
System13                   0
System14                   1
System16                   1
System17                   1
System22                   10800
System28                   1
System29                   1
System30                   20
System31                   15026 15057 15087 15117
System32                   5357
System33                   32768
System34                   16384
System35                   30583
System36                   15292
System37                   7646
System38                   140
System39                   300
System40                   0
System41                   0
System42                   2796
System43                   0
System44                   6
System45                   4
System46                   5000
System47                   32768
System48                   16384
System49                   30720
System50                   15360
System51                   7680
System52                   150
System53                   320
System39                   200 200 200 200
Start command              1
CRC download               Unknown
Hardware configuration
Serial number              VNO 0269
Internal code version      0
Revision number            4
Revision number            4
Firmware version          1.27

```

```

Head configuration
System 1                   1
System 1                   0
Head frequency             10000 kHz
Serial number              VCN 7333
Transformation matrix      8500 0 -8546 0
                          0 8402 0 -8404
                          2201 0 2017 0
                          0 2114 0 2108
Number of beams            4
System5                    0 0 0 0
System7                    0 2017 0 0
                          2114 0 2108 0
System8                    0 0 0
                          0 0 0
System9                    0 0 0
                          0 0 0
                          0 0 0
System10                   0 0 0 0
System11                   0 0 0 0
System13                   1481 259 7128 10861
System14                   0 0 0 0
                          0 0 0 0
System15                   0 0 0 0
                          0 0 0 0
                          0 0 0 0
                          0 0 0 0
System16                   0 0 0 0
System17                   0
System18                   0
System19                   0
System20                   10000

```

```

Velocity header
-----
Distance                   0.0993 m
Quality                    481 counts
Lag1 & Lag2 used          140 300 counts
Noise amplitude (beam1-4) 10 10 10 9 counts
Noise correlation (beam1-4) 0 12 0 16 %
Temperature                26.35 degrees C
Soundspeed                 1497.5 m/s

```

```

Data file format
-----
[C:\ADV_Vectrino_data\21_11_2006\Rigido\delahye-lopez\35aa.dat]
1 Status
2 Ensemble counter
3 Velocity (Beam1|X)      (m/s)
4 Velocity (Beam2|Y)      (m/s)
5 Velocity (Beam3|Z)      (m/s)
6 Velocity (Beam4|Z2)     (m/s)
7 Amplitude (Beam1)       (counts)
8 Amplitude (Beam2)       (counts)
9 Amplitude (Beam3)       (counts)
10 Amplitude (Beam4)      (counts)
11 SNR (Beam1)            (dB)
12 SNR (Beam2)            (dB)
13 SNR (Beam3)            (dB)
14 SNR (Beam4)            (dB)
15 Correlation (Beam1)    (%)
16 Correlation (Beam2)    (%)
17 Correlation (Beam3)    (%)
18 Correlation (Beam4)    (%)

```

Para cada condición de ensayo, confeccionamos la planilla explicada anteriormente de la cual obtenemos las velocidades promedio y las desviaciones estándar y armamos una planilla resumen que es la tabla N°1.

TABLA N°1

Posicion s/fondo [m]	Frecuencia [Hz]	Rango max. Veloc.[m/s]	λ	Volumen Control	V _x	Velocidad Medida			
						V _x prom	V _y prom	V _{z1} prom	V _{z2} prom
0,039	100	0,3	1,2	1,9	0,160758	0,1675	-0,0055	0,0075	0,0052
			1,8	5,5	0,172103				
			2,4	9,5	0,169738				
		1	1,2	1,9	0,174056	0,1747	-0,0027	0,0051	0,0026
			1,8	5,5	0,17498				
			2,4	9,5	0,174924				
	50	0,3	1,2	1,9	0,170316	0,1941	-0,0057	0,0024	-0,0004
			1,8	5,5	0,20468				
			2,4	9,5	0,207408				
		1	1,2	1,9	0,193132	0,2001	0,0090	0,0032	0,0002
			1,8	5,5	0,203435				
			2,4	9,5	0,203724				
	25	0,3	1,2	1,9	0,190711	0,1877	0,0076	0,0066	0,0039
			1,8	5,5	0,190718				
			2,4	9,5	0,181629				
1		1,2	1,9	0,196779	0,1924	0,0079	0,0047	0,0019	
		1,8	5,5	0,186856					
		2,4	9,5	0,193571					
0,067	100	0,3	1,2	1,9	0,176823	0,1775	0,0105	0,0069	0,0043
			1,8	5,5	0,178746				
			2,4	9,5	0,177041				
		1	1,2	1,9	0,189341	0,1950	0,0135	0,0026	-0,0003
			1,8	5,5	0,202227				
			2,4	9,5	0,193484				
	50	0,3	1,2	1,9	0,179742	0,1829	0,0103	0,0056	0,0030
			1,8	5,5	0,187821				
			2,4	9,5	0,181269				
		1	1,2	1,9	0,204534	0,1983	0,0134	0,0025	-0,0004
			1,8	5,5	0,195358				
			2,4	9,5	0,195056				
	25	0,3	1,2	1,9	0,186873	0,1879	0,0112	0,0060	0,0033
			1,8	5,5	0,18981				
			2,4	9,5	0,187053				
1		1,2	1,9	0,194048	0,1949	0,0131	0,0039	0,0011	
		1,8	5,5	0,193115					
		2,4	9,5	0,197497					
0,124	100	0,3	1,2	1,9	0,190945	0,1944	0,0097	0,0047	0,0019
			1,8	5,5	0,194541				
			2,4	9,5	0,197859				
		1	1,2	1,9	0,207927	0,2029	0,0118	0,0026	-0,0003
			1,8	5,5	0,206826				
			2,4	9,5	0,193806				
	50	0,3	1,2	1,9	0,204935	0,1989	0,0113	0,0040	0,0011
			1,8	5,5	0,202798				
			2,4	9,5	0,188838				
		1	1,2	1,9	0,194828	0,1994	0,0104	0,0023	-0,0006
			1,8	5,5	0,197567				
			2,4	9,5	0,205954				
	25	0,3	1,2	1,9	0,191433	0,1966	0,0106	0,0053	0,0024
			1,8	5,5	0,197654				
			2,4	9,5	0,200728				
1		1,2	1,9	0,200464	0,1989	0,0102	0,0035	0,0007	
		1,8	5,5	0,203266					
		2,4	9,5	0,193033					

También hemos armado la tabla N°2 en la que calculamos los porcentajes de las componentes (V_y , V_{z1} , V_{z2}) del vector velocidad en función de la velocidad del flujo (V_x).

TABLA N°2

Posicion s/fondo [m]	Frecuencia [Hz]	Rango max. Veloc.[m/s]	λ	Volumen Control	Porcentaje respecto a la V_x		
					V_y	V_{z1}	V_{z2}
0,039	100	0,3	1,2	1,9	3,27%	4,50%	3,11%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	1,55%	2,90%	1,49%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
	50	0,3	1,2	1,9	2,92%	1,24%	0,19%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	4,52%	1,58%	0,10%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
25	0,3	1,2	1,9	4,03%	3,54%	2,09%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				
	1	1,2	1,9	4,10%	2,43%	1,00%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				
0,067	100	0,3	1,2	1,9	5,93%	3,87%	2,44%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	6,95%	1,33%	0,14%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
	50	0,3	1,2	1,9	5,63%	3,07%	1,63%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	6,77%	1,25%	0,20%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
25	0,3	1,2	1,9	5,95%	3,18%	1,75%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				
	1	1,2	1,9	6,75%	2,00%	0,57%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				
0,124	100	0,3	1,2	1,9	5,00%	2,41%	0,98%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	5,84%	1,27%	0,13%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
	50	0,3	1,2	1,9	5,70%	2,00%	0,55%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
		1	1,2	1,9	5,23%	1,17%	0,31%
			1,8	5,5			
			2,4	9,5			
25	0,3	1,2	1,9	5,41%	2,67%	1,23%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				
	1	1,2	1,9	5,11%	1,78%	0,34%	
		1,8	5,5				
		2,4	9,5				

En las tablas N°3, N°4 y N°5, graficamos los perfiles de velocidades (para las tres posiciones tomadas) obtenidos para las distintas variables ensayadas en cada frecuencia.

TABLA N°3

Frecuencia [Hz]		100							
Rango de vel. [m/c]		0,3				1			
Longitud λ		1,2	1,8	2,4	Promedio	1,2	1,8	2,4	Promedio
Volumen		1,9	5,5	9,1		1,9	5,5	9,1	
Posición [m]	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,039	0,1608	0,1721	0,1697	0,1675	0,1741	0,1750	0,1749	0,1747
	0,0674	0,1768	0,1787	0,1770	0,1775	0,1893	0,2022	0,1935	0,1950
	0,124	0,1909	0,1945	0,1979	0,1944	0,2079	0,2068	0,1938	0,2029

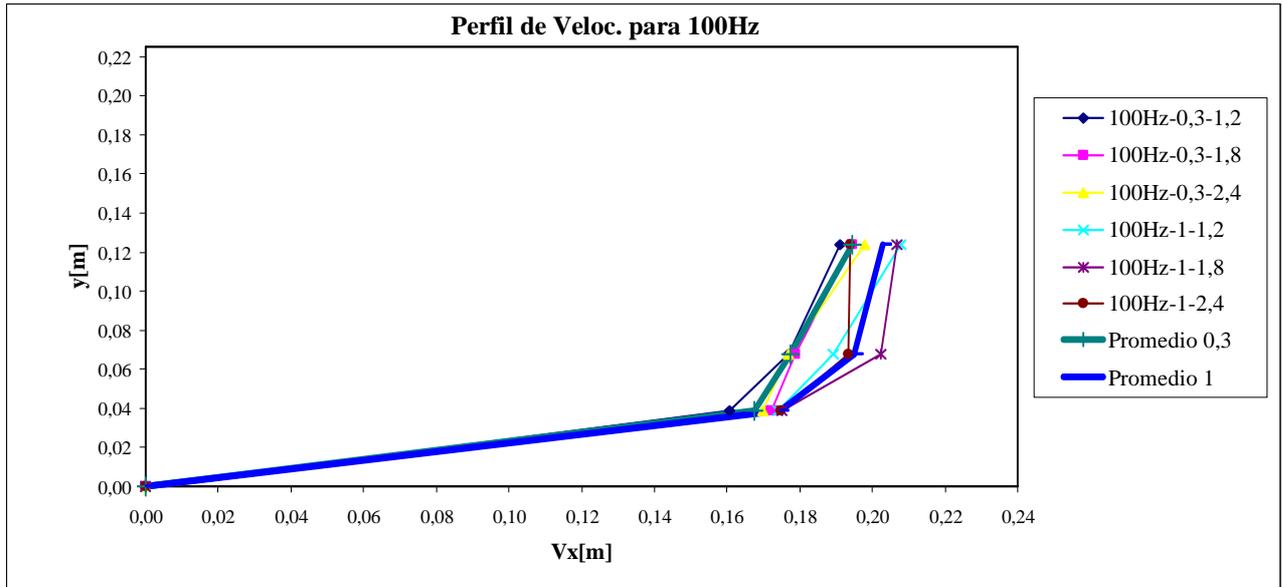


TABLA N°4

Frecuencia [Hz]		50							
Rango de vel. [m/c]		0,3				1			
Longitud λ		1,2	1,8	2,4	Promedio	1,2	1,8	2,4	Promedio
Volumen		1,9	5,5	9,1		1,9	5,5	9,1	
Posición [m]	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,039	0,1703	0,2047	0,2074	0,1941	0,1931	0,2034	0,2037	0,2001
	0,0674	0,1797	0,1878	0,1813	0,1829	0,2045	0,1954	0,1951	0,1983
	0,124	0,2049	0,2028	0,1888	0,1989	0,1948	0,1976	0,2060	0,1994

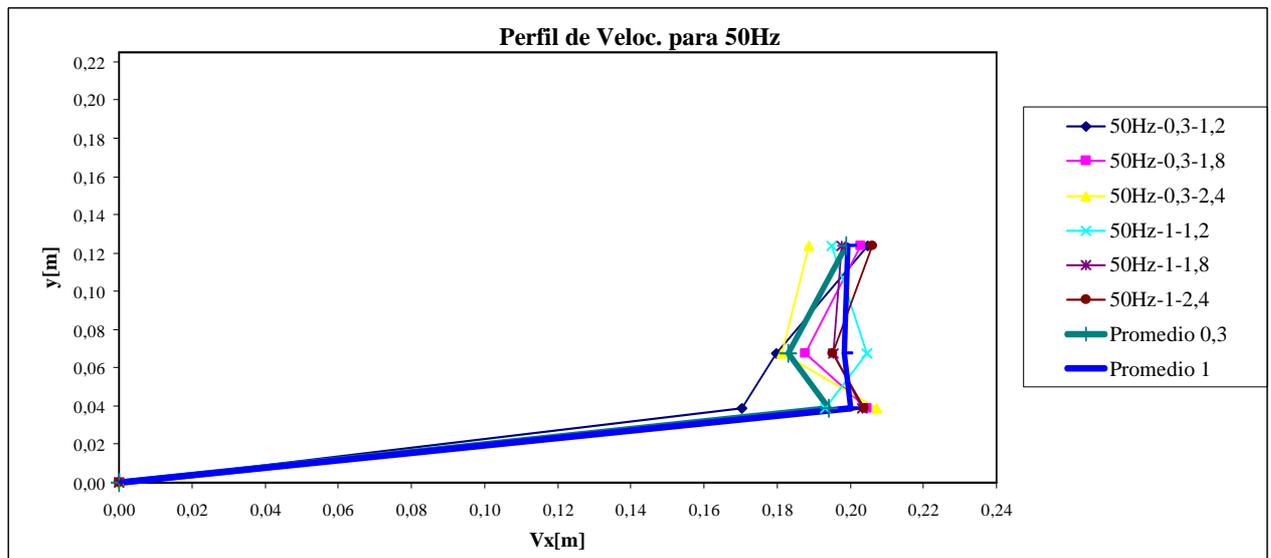


TABLA N°5

Frecuencia [Hz]		25							
Rango de vel. [m/c]		0,3				1			
Longitud λ		1,2	1,8	2,4	Promedio	1,2	1,8	2,4	Promedio
Volumen		1,9	5,5	9,1		1,9	5,5	9,1	
Posición [m]	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,039	0,1907	0,1907	0,1816	0,1877	0,1968	0,1869	0,1936	0,1924
	0,0674	0,1869	0,1898	0,1871	0,1879	0,1940	0,1931	0,1975	0,1949
	0,124	0,1914	0,1977	0,2007	0,1966	0,2005	0,2033	0,1930	0,1989

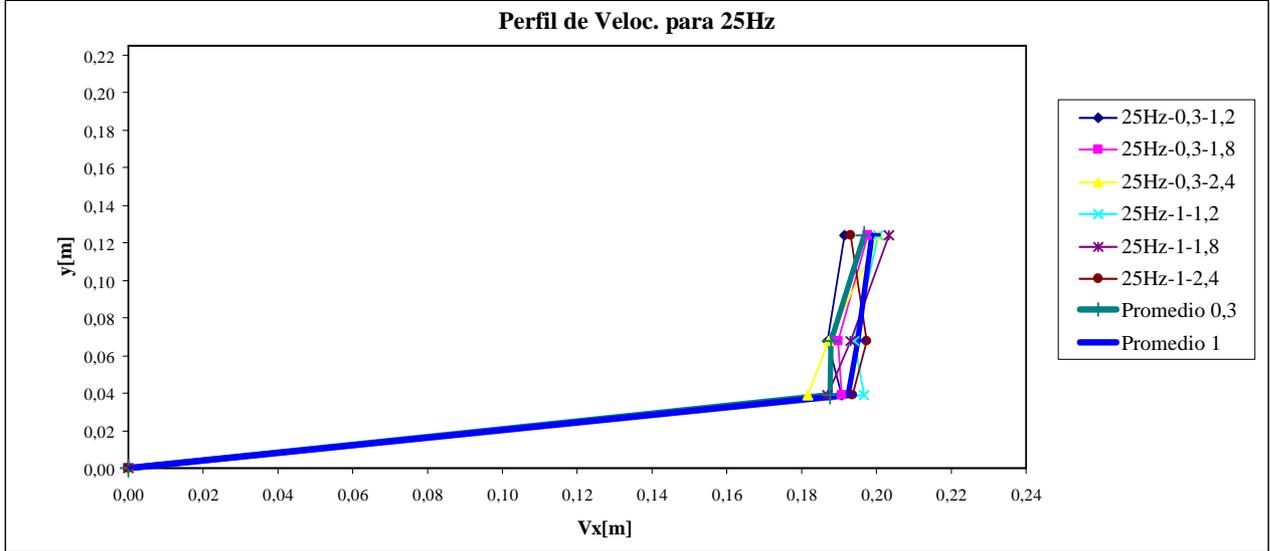
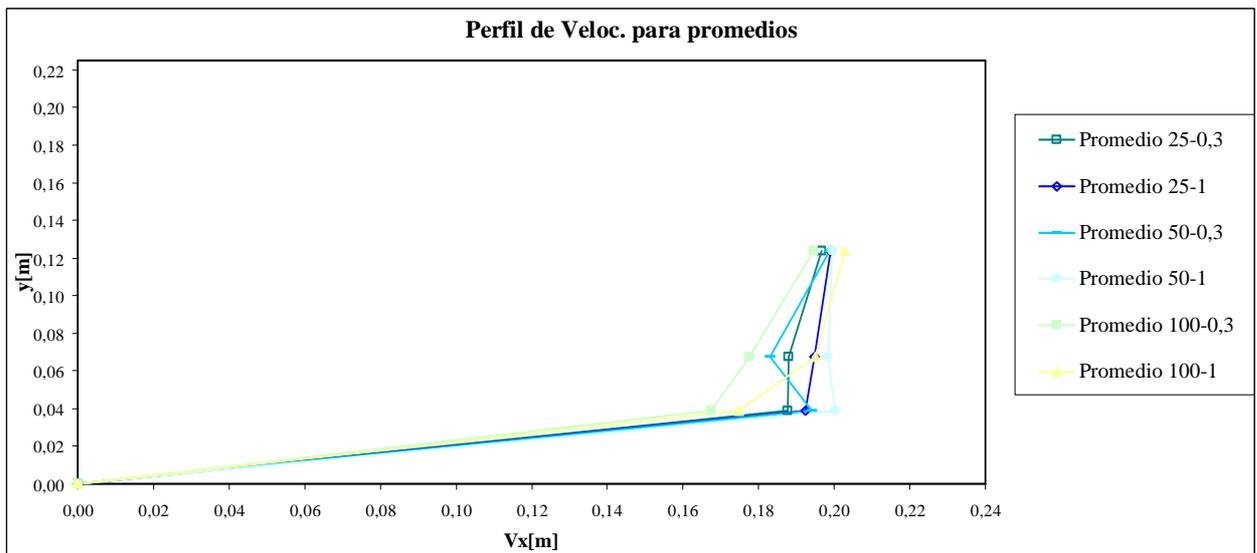


TABLA N°6

Frecuencia [Hz]		25		50		100	
Rango de vel. [m/c]		0,3	1	0,3	1	0,3	1
Longitud λ		Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Volumen							
Posición [m]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	0,039	0,1877	0,1924	0,1941	0,2001	0,1675	0,1747
	0,0674	0,1879	0,1949	0,1829	0,1983	0,1775	0,1950
	0,124	0,1966	0,1989	0,1989	0,1994	0,1944	0,2029



En la tabla N°6 representamos los promedios de promedio para cada frecuencia y rango de velocidad.

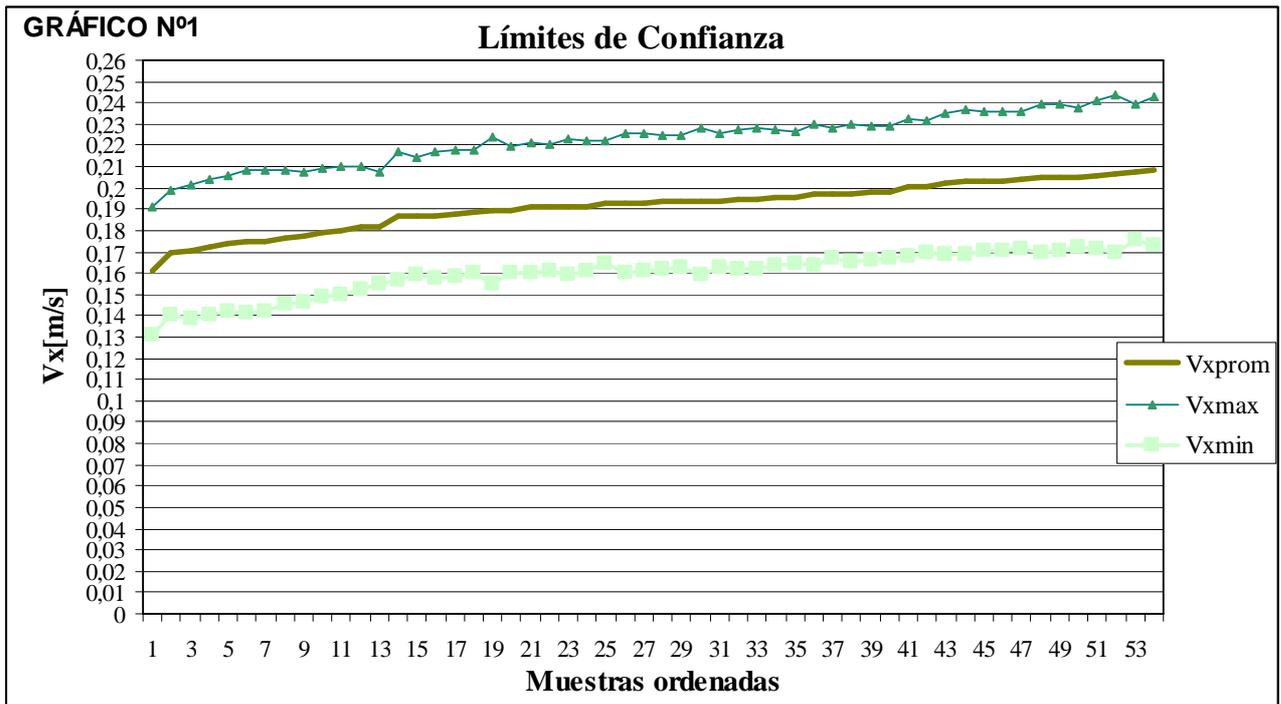
Realizamos otra planilla resumen donde informamos las desviaciones estándar, tabla N°7. Confeccionamos la tabla N°8 conociendo el valor promedio de la velocidad en la dirección del flujo (V_x), y a ésta le sumamos y restamos la mitad de la desviación estándar, obteniendo así los límites de confiabilidad (Gráfico N°1).

TABLA N°7

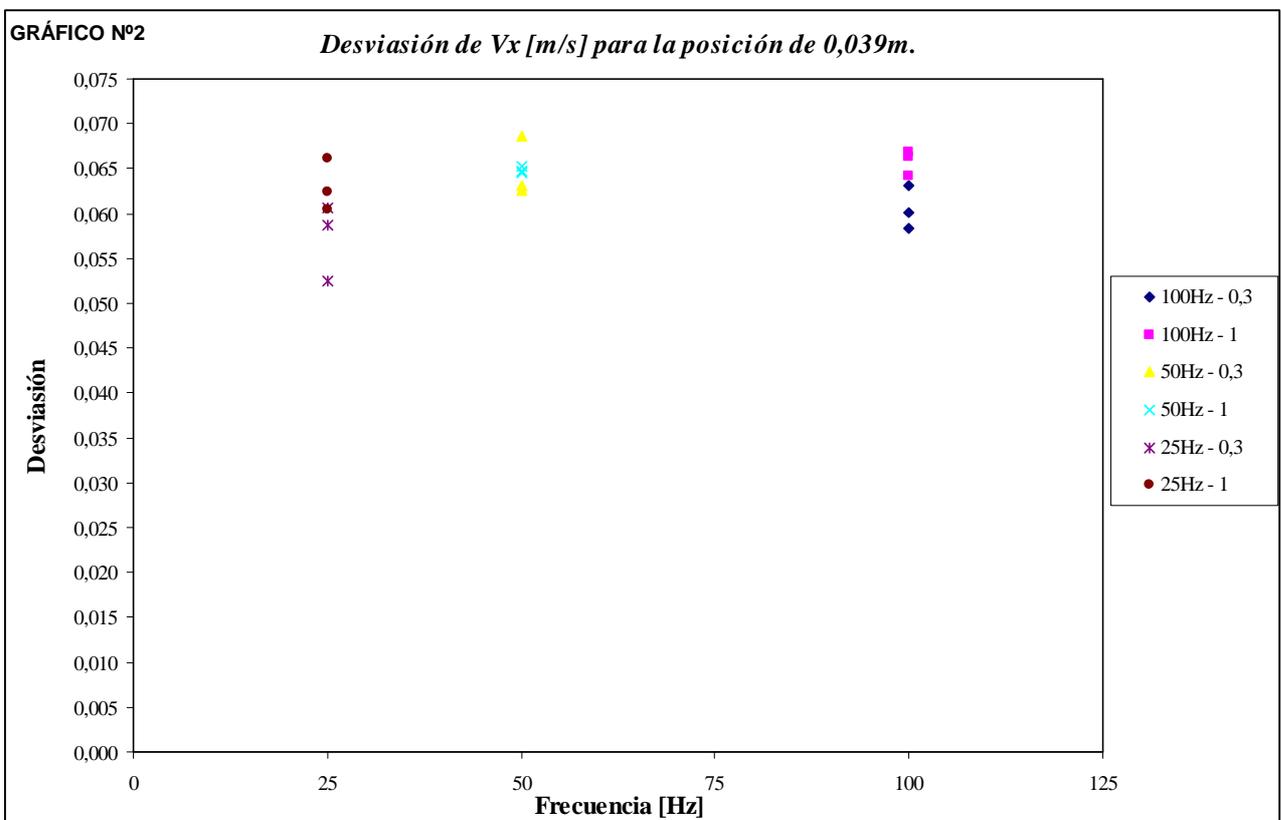
Posicion s/fondo [m]	Frecuencia [Hz]	Rango max. Veloc.[m/s]	λ	Volumen Control	Desviación Estandar			
					Vx	Vy	Vz1	Vz2
0,039	100	0,3	1,2	1,9	0,0601	0,0550	0,0314	0,0319
			1,8	5,5	0,0631	0,0540	0,0333	0,0335
			2,4	9,5	0,0584	0,0658	0,0322	0,0324
		1	1,2	1,9	0,0642	0,0837	0,0328	0,0373
			1,8	5,5	0,0663	0,0687	0,0349	0,0361
			2,4	9,5	0,0668	0,0587	0,0335	0,0337
	50	0,3	1,2	1,9	0,0627	0,0590	0,0326	0,0330
			1,8	5,5	0,0686	0,0584	0,0358	0,0359
			2,4	9,5	0,0632	0,0576	0,0354	0,0355
		1	1,2	1,9	0,0647	0,0596	0,0352	0,0357
			1,8	5,5	0,0652	0,0576	0,0348	0,0351
			2,4	9,5	0,0645	0,0566	0,0350	0,0350
	25	0,3	1,2	1,9	0,0606	0,0547	0,0319	0,0320
			1,8	5,5	0,0587	0,0523	0,0310	0,0311
			2,4	9,5	0,0525	0,0481	0,0276	0,0277
		1	1,2	1,9	0,0661	0,0673	0,0334	0,0355
			1,8	5,5	0,0605	0,0525	0,0317	0,0317
			2,4	9,5	0,0624	0,0520	0,0323	0,0324
0,067	100	0,3	1,2	1,9	0,0634	0,0592	0,0357	0,0362
			1,8	5,5	0,0604	0,0535	0,0344	0,0348
			2,4	9,5	0,0606	0,0542	0,0340	0,0342
		1	1,2	1,9	0,0683	0,0617	0,0386	0,0391
			1,8	5,5	0,0662	0,0576	0,0370	0,0373
			2,4	9,5	0,0625	0,0583	0,0383	0,0386
	50	0,3	1,2	1,9	0,0603	0,0533	0,0327	0,0331
			1,8	5,5	0,0596	0,0559	0,0357	0,0359
			2,4	9,5	0,0570	0,0538	0,0348	0,0350
		1	1,2	1,9	0,0691	0,0618	0,0393	0,0397
			1,8	5,5	0,0616	0,0579	0,0366	0,0368
			2,4	9,5	0,0636	0,0560	0,0369	0,0371
	25	0,3	1,2	1,9	0,0553	0,0537	0,0331	0,0332
			1,8	5,5	0,0588	0,0533	0,0357	0,0357
			2,4	9,5	0,0594	0,0537	0,0357	0,0358
		1	1,2	1,9	0,0626	0,0567	0,0359	0,0360
			1,8	5,5	0,0654	0,0561	0,0370	0,0372
			2,4	9,5	0,0614	0,0570	0,0370	0,0371
0,124	100	0,3	1,2	1,9	0,0642	0,0594	0,0371	0,0375
			1,8	5,5	0,0659	0,0565	0,0386	0,0388
			2,4	9,5	0,0622	0,0541	0,0360	0,0363
		1	1,2	1,9	0,0702	0,0637	0,0411	0,0416
			1,8	5,5	0,0744	0,0646	0,0423	0,0427
			2,4	9,5	0,0690	0,0607	0,0420	0,0423
	50	0,3	1,2	1,9	0,0650	0,0591	0,0400	0,0403
			1,8	5,5	0,0674	0,0576	0,0387	0,0390
			2,4	9,5	0,0576	0,0494	0,0341	0,0345
		1	1,2	1,9	0,0661	0,0582	0,0393	0,0397
			1,8	5,5	0,0643	0,0580	0,0400	0,0402
			2,4	9,5	0,0700	0,0587	0,0405	0,0408
	25	0,3	1,2	1,9	0,0612	0,0548	0,0379	0,0380
			1,8	5,5	0,0632	0,0552	0,0378	0,0379
			2,4	9,5	0,0616	0,0543	0,0375	0,0376
		1	1,2	1,9	0,0645	0,0596	0,0413	0,0415
			1,8	5,5	0,0650	0,0569	0,0397	0,0398
			2,4	9,5	0,0573	0,0515	0,0354	0,0355

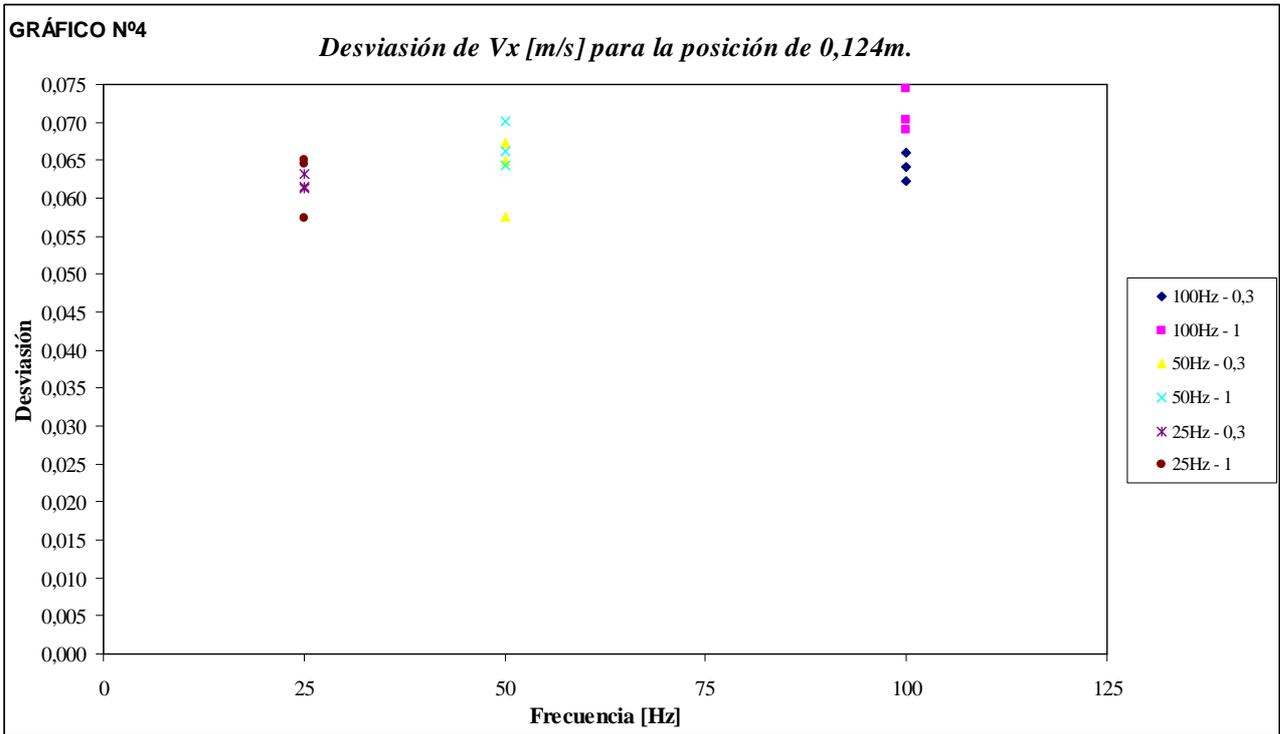
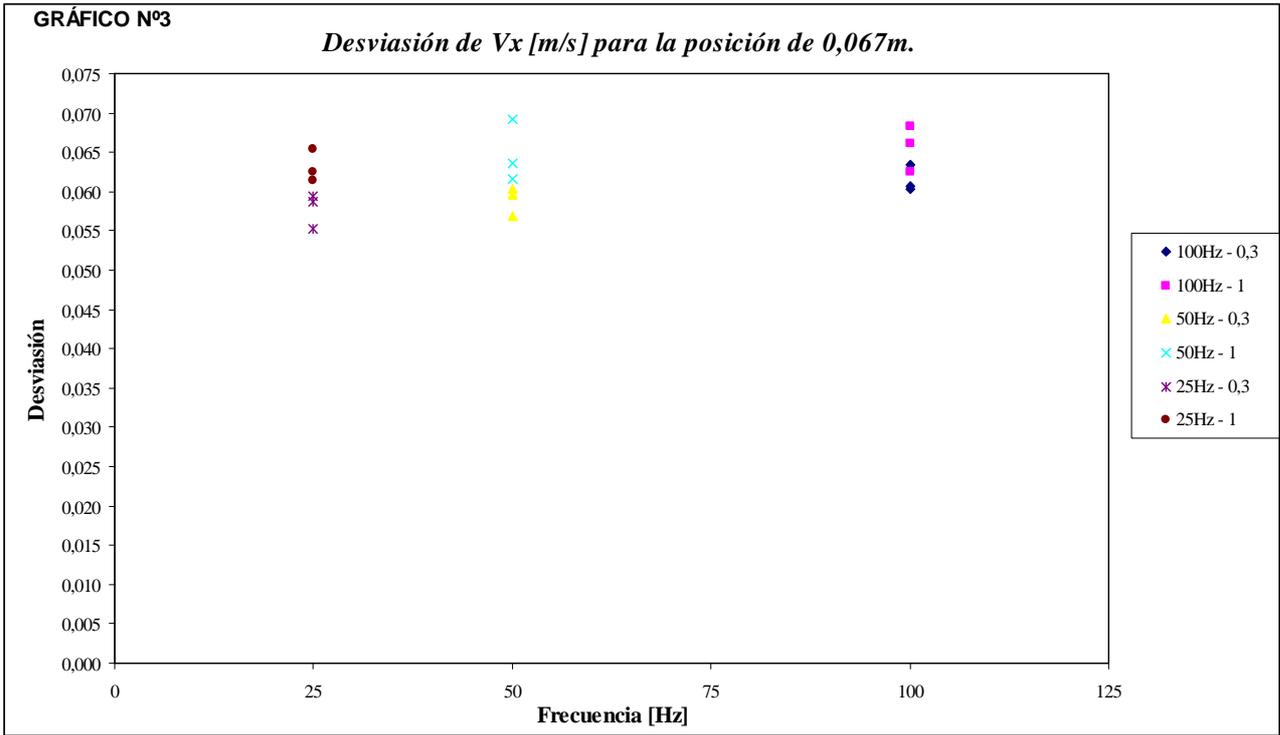
TABLA Nº8

Posicion s/fondo [m]	Frecuencia [Hz]	Rango max. Veloc.[m/s]	λ	Volumen Control	Vxprom	Vxmax	Vxmin
					0,039	100	0,3
1,8	5,5	0,1721	0,2037	0,1405			
2,4	9,5	0,1697	0,1989	0,1405			
1	1,2	1,9	0,1741	0,2062			0,1419
	1,8	5,5	0,1750	0,2081			0,1419
	2,4	9,5	0,1749	0,2083			0,1415
50	0,3	1,2	1,9	0,1703		0,2016	0,1390
		1,8	5,5	0,2047		0,2390	0,1704
		2,4	9,5	0,2074		0,2390	0,1758
	1	1,2	1,9	0,1931		0,2255	0,1608
		1,8	5,5	0,2034		0,2360	0,1708
		2,4	9,5	0,2037		0,2360	0,1715
25	0,3	1,2	1,9	0,1907		0,2210	0,1604
		1,8	5,5	0,1907		0,2201	0,1614
		2,4	9,5	0,1816		0,2079	0,1554
	1	1,2	1,9	0,1968		0,2298	0,1637
		1,8	5,5	0,1869		0,2171	0,1566
		2,4	9,5	0,1936		0,2248	0,1624
0,067	100	0,3	1,2	1,9	0,1768	0,2085	0,1451
			1,8	5,5	0,1787	0,2089	0,1486
			2,4	9,5	0,1770	0,2073	0,1467
		1	1,2	1,9	0,1893	0,2235	0,1552
			1,8	5,5	0,2022	0,2353	0,1691
			2,4	9,5	0,1935	0,2247	0,1622
	50	0,3	1,2	1,9	0,1797	0,2099	0,1496
			1,8	5,5	0,1878	0,2176	0,1580
			2,4	9,5	0,1813	0,2098	0,1528
		1	1,2	1,9	0,2045	0,2391	0,1700
			1,8	5,5	0,1954	0,2261	0,1646
			2,4	9,5	0,1951	0,2269	0,1633
	25	0,3	1,2	1,9	0,1869	0,2145	0,1592
			1,8	5,5	0,1898	0,2192	0,1604
			2,4	9,5	0,1871	0,2168	0,1573
		1	1,2	1,9	0,1940	0,2253	0,1628
			1,8	5,5	0,1931	0,2258	0,1604
			2,4	9,5	0,1975	0,2282	0,1668
0,124	100	0,3	1,2	1,9	0,1909	0,2230	0,1589
			1,8	5,5	0,1945	0,2275	0,1616
			2,4	9,5	0,1979	0,2289	0,1668
		1	1,2	1,9	0,2079	0,2430	0,1728
			1,8	5,5	0,2068	0,2440	0,1696
			2,4	9,5	0,1938	0,2283	0,1593
	50	0,3	1,2	1,9	0,2049	0,2374	0,1725
			1,8	5,5	0,2028	0,2365	0,1691
			2,4	9,5	0,1888	0,2176	0,1601
		1	1,2	1,9	0,1948	0,2279	0,1618
			1,8	5,5	0,1976	0,2297	0,1654
			2,4	9,5	0,2060	0,2410	0,1709
	25	0,3	1,2	1,9	0,1914	0,2220	0,1608
			1,8	5,5	0,1977	0,2293	0,1660
			2,4	9,5	0,2007	0,2315	0,1699
		1	1,2	1,9	0,2005	0,2327	0,1682
			1,8	5,5	0,2033	0,2358	0,1708
			2,4	9,5	0,1930	0,2217	0,1644



Hemos representado gráficamente la desviación de la componente de la velocidad V_x para cada posición del aparato (Gráfico N°2, N°3, N°4).





Con respecto a las otras componentes, en el Gráfico N°5 y N°6 vemos las desviaciones para las distintas configuraciones de ensayo, en las tres posiciones (54 casos).

GRÁFICO Nº5

Desviación de Vy [m/s] para las configuraciones en las tres posiciones.

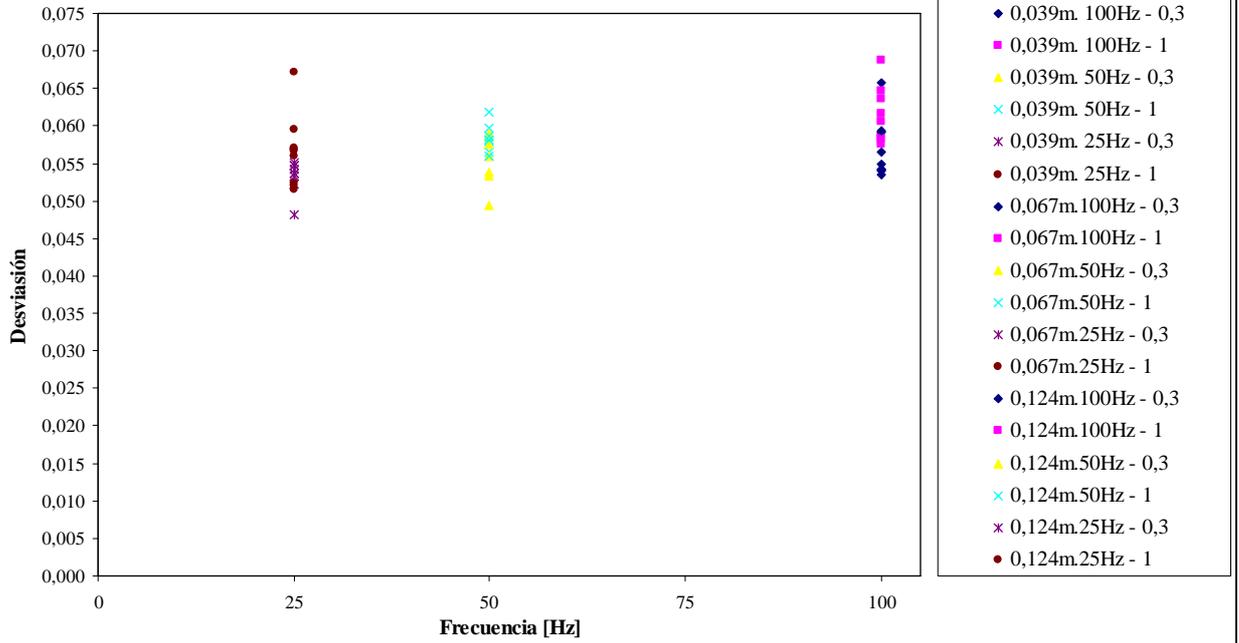
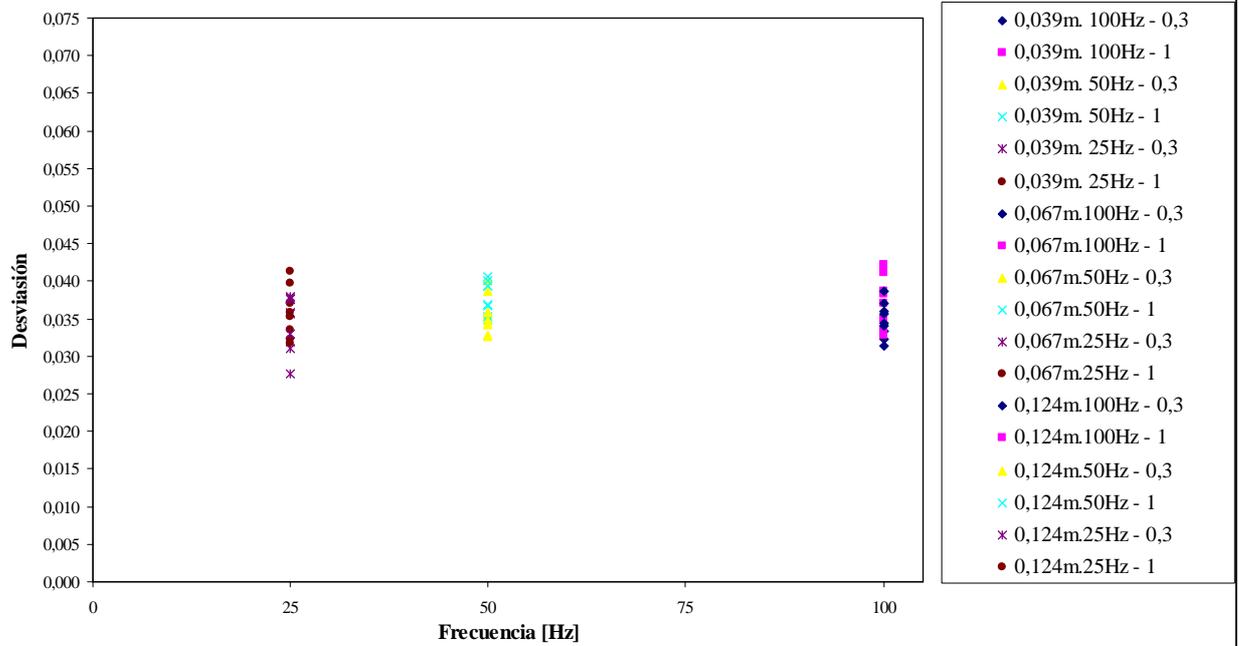


GRÁFICO Nº6

Desviación de Vz1 [m/s] para las configuraciones en las tres posiciones.



CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos podemos concluir que las bandas de confianza no aumentan su dimensión en forma considerable con el aumento de la velocidad para el rango de velocidades medidas que están entre 0,16 m/s y 0,20 m/s (como se muestra en el Gráfico N°1). Es posible en el futuro determinar si estas bandas de confianza continúan constantes, o varían para rangos de velocidad más amplios que el medido.

De todas las configuraciones planteadas, definidas a partir de las variables de ensayo, concluimos como se ve en las Gráficas N°2, N°3 y N°4, que las menores dispersiones las obtuvimos para una frecuencia de 25Hz y un rango de velocidades $\pm 0,3$ m/s en el caso de la dirección V_x . Para el caso de las componentes V_y , V_z podemos ver en las Gráficas N°5 y N°6 respectivamente, que la menor desviación también corresponde para la configuración de frecuencia 25Hz y rango de velocidades $\pm 0,3$ m/s. Para la longitud de onda no podemos asegurar cual es la más conveniente ya que los datos no son suficientes, pero si podemos decir que si la longitud de onda es mayor, el volumen de control también aumentará, dando como resultado, un mayor número de muestras tomadas por el aparato para la integración de las componentes de velocidades, es decir menor desviación.

Por último, comparando las frecuencias para las tres posiciones y las distintas variantes, vemos de las tablas N°3, N°4 y N°5, que para la frecuencia 25 Hz la dispersión que existe respecto al rango de velocidades no es tan acentuada como para la frecuencia de 100 Hz en donde la dispersión es más notable para el rango de velocidades ± 1 m/s. En el caso de la frecuencia de 50 Hz, los datos no son confiables debido a la dispersión que se presenta (gráfico de Tabla N°4).

BIBLIOGRAFÍA

Shames I. H., *Mecánica de Fluidos*, McGraw-Hill Book Company, Tercera Edición, Colombia, 1995.

BLANCKAERT K., LEMMIN U., *Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements*
Moyens de réduction de bruit des mesures acoustiques de la turbulence, Journal of Hydraulic Research Vol. 44, No. 1 (2006)

Ven Te Chow, *Hidráulica de canales abiertos*,

Sotelo A.,

Apuntes de clase.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. O. Dolling, por ofrecernos la posibilidad de ensayar el aparato.

Al Ing. Orellano, por permitirnos el uso del laboratorio (IDIH).

A la Ing. Z. Mena, por enseñarnos a usar el aparato.

Al Dr. Ing. C. M. García, por analizar nuestros resultados y brindarnos sus conocimientos sobre el aparato.

A los laboratoristas del IDIH por ayudarnos a montar el aparato.