



CARACTERIZACIÓN DE LA ESTELA DE UN GENERADOR DE VÓRTICES DE TIPO ALETA INMERSO EN UN FLUJO TURBULENTO

P. Mantelli^a, G. Capittini^{a,b} y J.S. Delnero^{a,b}

^aLaCLyFA (Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Dpto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. <http://www.ing.unlp.edu.ar>

^bCONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. www.conicet.gov.ar

Palabras claves: Control de Flujo, Generadores de Vórtices, Capa Límite

Resumen

El presente trabajo se encuentra orientado en la rama del control de flujo (CF). Siendo una de las principales preocupaciones actuales el ahorro energético, resulta natural que la eficiencia sea una constante a la hora del diseño de cualquier sistema ingenieril. Dentro del campo fluidodinámico la noción de eficiencia nos lleva irremediamente a la necesidad de un sistema de CF, este sistema puede tener distintos objetivos, uno de los más usuales y conocidos es el control de la capa límite, dado que los desprendimientos de esta resultan ser los principales causante de aumentos en la resistencia y por ende disminución en la eficiencia. Uno de los sistemas más simples de CF consta de pequeñas superficies fijas instaladas sobre el cuerpo en movimiento que modifican las características del flujo en sus inmediaciones, esta técnica pasiva de CF se denomina CF por Generadores de Vórtices (VG). En este trabajo nos encargaremos de caracterizar la estela de un VG del tipo aleta a distintos ángulos de ataque y números de Reynolds, con el objetivo de poder determinar para cada caso, una zona de influencia del mismo, como también las características turbulentas de la estela, ya que estas son las que al energizar la capa límite logran que el desprendimiento de la misma se retrase. La caracterización se realizó mediante mediciones de velocidad con un equipo de anemometría de hilo caliente, para distintos planos detrás del VG, estos planos constaron de grillas de puntos, en los cuales se realizan las mediciones. Para lograr caracterizar la estela, se procesaron las mediciones de velocidad, obteniéndose de las mismas las escalas características de la turbulencia, la energía total y su distribución en frecuencia, también se analizaron las componentes medias de la velocidad, con el objeto de obtener una idea visual del campo de flujo. A partir de estos resultados y con un criterio comparativo de por medio se obtuvo la zona de influencia del VG, y el aumento cualitativo de los parámetros característicos de la turbulencia debido a el.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de comparar resultados experimentales o teóricos, ya sea en el campo de la fluidodinámica o en cualquier otro de la ciencia, nos hace necesario definir parámetros con los cuales podamos saber cuándo un modelo es equivalente a otro. En nuestro caso particular este parámetro es el número de Reynolds, este número es una medida entre las fuerzas inerciales y las viscosas a las que se ve sometido nuestro sistema cuerpo-fluido.

El número de Re de un objeto, que se encuentra en el seno de un fluido en movimiento, nos dice la relación existente entre las fuerzas viscosas y de inercia que sufre una partícula del flujo que rodea el cuerpo. Este número adimensional es de gran utilidad, por ejemplo si tenemos un objeto en el seno de un fluido que se mueve a una velocidad y luego al mismo lo sumergimos en otro tipo de fluido que se mueve a una velocidad distinta al del anterior y para ambos casos obtenemos el mismo número de Reynolds, se dice que las dos condiciones serán fluidomecánicamente semejantes, es decir que la proporción entre las fuerzas viscosas y de inercia que sufre una partícula serán iguales en ambos casos. [1]

Al sumergir un cuerpo como en un flujo, como por ejemplo el aire, se generan fuerzas que actúan sobre la superficie del mismo. Estas fuerzas son generadas por la variación del campo de presiones a lo largo de todo su perímetro. En el caso de un perfil aerodinámico, la resultante de esta fuerza suele separarse en dos, una en la dirección perpendicular a la corriente incidente y otra alineada con la misma. Estas se denominan sustentación y resistencia respectivamente. Con el fin de mejorar el tratamiento analítico se introducen coeficientes adimensionales ya que estos resultan función del número de Reynolds y no de las magnitudes que lo componen independientemente. En aerodinámica, los coeficientes más conocidos son el coeficiente de sustentación C_l y el coeficiente de resistencia C_d

Por lo expuesto anteriormente se establece que para un cuerpo sumergido en flujos distintos pero de igual Re los índices o coeficientes adimensionales, como el C_l o C_d , serán iguales en ambos casos y dependerán de dicho número.

Si consideramos los efectos locales de las fuerzas viscosas sobre el cuerpo inmerso en el fluido, se observa que inmediatamente en la pared del cuerpo, el flujo se frena debido a las fuerzas de roce creando la denominada capa límite o también capa de rozamiento, esta capase encuentra en la zona donde las fuerzas viscosas son considerables, esto es donde la velocidad real del fluido resulta menor a la velocidad que tendría el mismo en ausencia de estas fuerzas, marcando como límite práctico el punto donde la velocidad real alcanza el 99% de la velocidad ideal.

En el caso de que el cuerpo sea una placa plana el espesor de la capa de rozamiento aumenta a lo largo de la misma, de adelante hacia atrás. Esto significa que entre más gruesa la capa límite se frenaran más líneas de corriente ubicadas a una mayor distancia perpendicular a la placa. La materia rezagada en la capa límite no siempre queda pegada como una tenue lamina a la pared del obstáculo en toda su longitud, puede ocurrir que corriente abajo la capa límite se espese considerablemente y surja una corriente de retroceso. De ese modo la materia es sacada a la corriente exterior, y por lo tanto, separada del cuerpo. Cuando esto sucede se dice que la capa se encuentra desprendida, esto conlleva una activa formación de remolinos y gran pérdida de energía aguas abajo de la placa.

Para explicar el fenómeno de desprendimiento es mejor considerar como cambia la corriente libre alrededor de un cuerpo como por ejemplo el de un cilindro de revolución (Figura 1 [1]). Si primero analizamos la corriente libre, en el instante donde el efecto la capa límite sobre las líneas de corriente aún es muy tenue (el flujo no tiene rozamiento), desde el punto D al E la corriente se acelera lo que provoca una caída de presión en esa zona, desde E a F la presión aumenta. Para cada partícula de la corriente externa hay transformación de energía de presión a energía cinética en el camino de D a E, y esa energía cinética ganada vuelve a transformarse en energía de presión de E a F, donde la velocidad de la partícula en F será igual a la velocidad inicial en D. Luego de un tiempo, con la capa límite ya desarrollada, las partículas del fluido dentro de la capa se encuentran sometidas a la misma presión que sufre la corriente libre pero debido al rozamiento dentro de la capa límite las partículas más próximas a la pared pierden energía cinética (de D a E) lo cual les dificulta vencer el gradiente de presión que hay de E a F. Tales partículas no pueden penetrar la región de presión creciente, luego se detienen y son arrastradas hacia atrás por la distribución de las presiones en la corriente externa.[1]

Siempre hay riesgo de desprendimiento de la capa límite en los trayectos de presión creciente y más cuanto más rápido sea ese crecimiento, sobre todo en cuerpos de perfil posterior redondeado.

En la figura 2 [1] se ve como a consecuencia de la contracorriente cerca de la pared se produce un fuerte espesamiento de la capa límite, que lleva consigo un acarreo de materia desde dicha capa a la corriente externa.

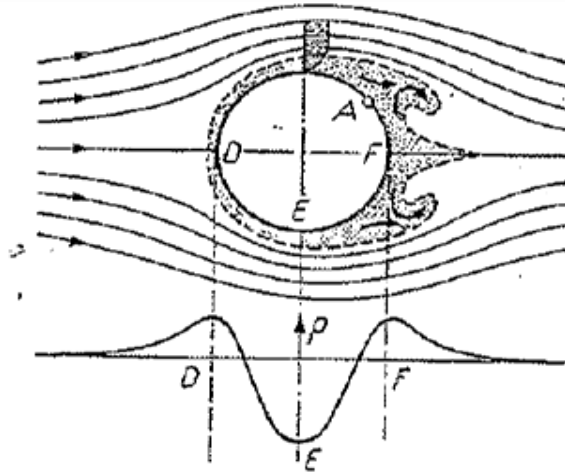


Figura 1: corriente libre alrededor de un cuerpo romo

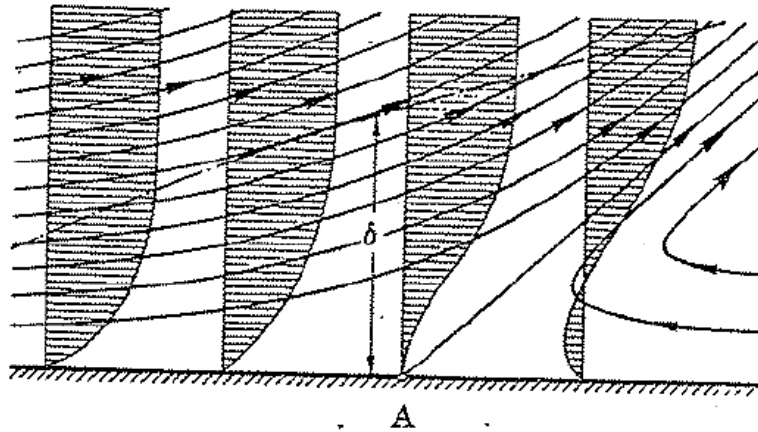


Figura 2: contracorriente cerca de la pared

El desprendimiento es con frecuencia bastante sensible a pequeños cambios de forma de obstáculos, sobre todo, cuando tales cambios influyen mucho en el campo de presión. En la camioneta de la figura 3[1] se puede ver como un frente anguloso desprende desde las esquinas anteriores, en comparación a un frente redondeado donde desprende desde las esquinas posteriores, y las consecuencias de estos desprendimientos en el coeficiente de resistencia. [1].

	<p>a) frente anguloso</p> <p>Desprendida</p>	$C_{fr} = 0,76$
	<p>b) frente redondeado</p> <p>Adaptada</p>	$0,12$

Figura 3: frente anguloso vs frente redondeado

Existe un valor de Re para el cual la capa límite laminar pasa a una capa límite turbulenta donde aparecen, en las componentes de la velocidad, valores de fluctuación no despreciables. Esta fluctuación provoca un desorden en la corriente provocando movimientos transversos irregulares, a tal estado de movimiento se le llama turbulento. Este número crítico de Re también dependerá en gran medida de la turbulencia misma de la corriente libre que incide sobre el objeto. La capa turbulenta posee más energía que la laminar y por ello acrecienta notablemente la resistencia de piel al paso del fluido. Esta fluctuación provoca una energización en la capa límite y como resultado se observa que el punto de desprendimiento se retrasa.

Para la capa límite de una placa plana se tiene en primer lugar una capa límite laminar en el borde anterior, y corriente adelante otra turbulenta, estando determinado el punto de transición por el mismo Re crítico. En general, en flujo turbulento, el espesor de la capa límite es mayor que en régimen laminar. Para una placa plana, en flujo longitudinal, el espesor de la capa aumenta corriente adelante. [1]

Dado a la gran pérdida de energía asociada a la separación de la capa límite, el control de la separación del fluido es de gran importancia para muchas tecnologías donde se aplica la mecánica de los fluidos. Controlar la separación de la capa límite resulta en un incremento en la performance del sistema con el consiguiente ahorro de energía y, en algunos casos, ahorro de peso y espacio. En el transporte civil los diseñadores de aviones se enfocan a soluciones de bajo costo, mientras que los aviones de combate buscan operar de manera eficiente a través de una amplia gama de condiciones. Estos tipos de compromisos llevan, en algunos casos, a la aeronave operar con el flujo desprendido o muy cercano al desprendimiento. [2]

Una solución práctica, para evitar tales desprendimientos de flujo, radica en el uso de dispositivos de control de flujo para proporcionar un incremento de la libertad en el proceso de diseño para lograr la mayor optimización. Un método convencional pasivo, de control de flujo, son los generadores de vórtices (VGs), estos dispositivos tienen una altura en el orden del espesor de la capa límite, y son utilizados para el control de separación del flujo generando el aumento del espesor de la capa límite mediante la transferencia de energía del exterior (flujo libre) hacia la zona de la capa límite.

Estos convencionales VGs son utilizados para retrasar la separación de la capa límite, para mejorar la sustentación de aviones, para reducir el drag en la parte posterior de fuselajes de aviones, y para evitar o retrasar la separación en difusores subsónicos. Los VGs de forma convencional tienen como inconveniente que generan un gran aumento de turbulencia en la estela que deja el avión, esto se ha logrado reducir utilizando VGs de forma no convencional que suelen tener una altura aproximada a la mitad del espesor de la capa límite. Para el control de la separación de la capa límite se ha descubierto que el espesor de un VG convencional de 0.625 de la capa límite tiene una performance muy similar a un VG con un espesor igual al de la capa límite. [2]

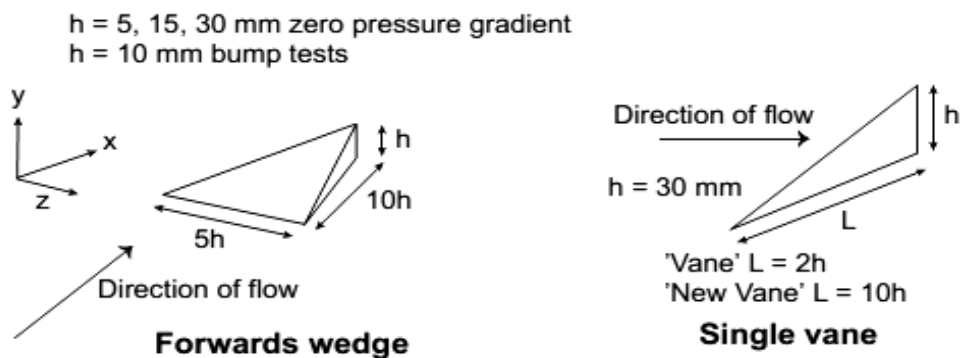


Figura 4: tipos de VGs

Los VGs no solo tienen aplicaciones aeronáuticas, también son muy utilizados en la industria automotriz, sobre todo en la F1.

Los vórtices se forman como consecuencia de la interacción de la superficie del VG con la corriente libre, como resultado, el aire a alta presión que pasa alrededor de la superficie del perfil aerodinámico tiende a ser aspirado la región donde la presión es baja. La velocidad a la que se produce este proceso provoca una rotación de la masa de aire que se extiende desde el borde de salida del perfil aerodinámico, formando un vórtice alargado.

La mayoría de las investigaciones se han enfocado en resultados experimentales de prueba y error y muy pocos estudios han hechos modelos teóricos dada la dificultad que involucra esto. [3]

La efectividad de los generadores de vórtices esta usualmente determinada por tres cosas:

1. Orientación
2. Espaciamiento entre ellos
3. Posición en términos de % de la cuerda del ala o superficie aerodinámica

Hay dos formas de orientar los VG una es de forma co-rotario donde todos tienen la misma orientación respecto al flujo incidente y los contra-rotatorios donde se colocan en direcciones opuestas (figura 5). Cuando se colocan en la orientación contra-rotatoria, pierden efectividad en distancias muy largas ya que los vórtices tienden a restarse y desvanecerse dado que están girando en sentidos opuestos [3]. Lo co-rotacionales son mejores en distancias largas y tardan más en desvanecerse.

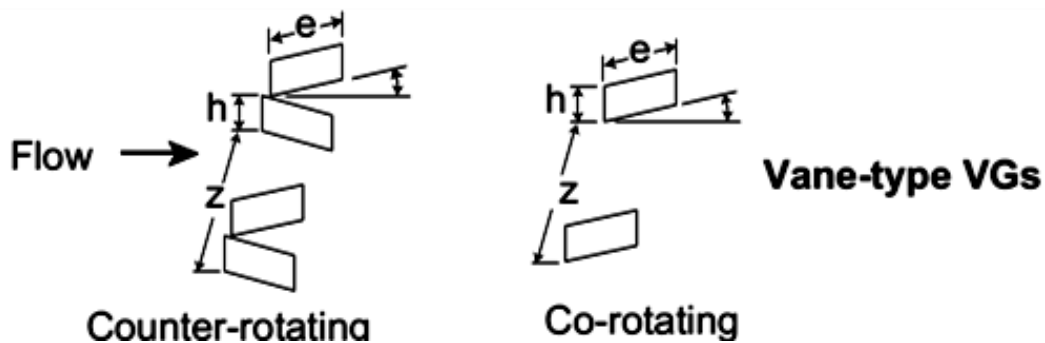


Figura 5: orientación de VG [3]

Se instalan antes de la zona de transición (laminar/turbulento) y antes de que el flujo se desprenda. Si su ubicación es tal que sobrepasen la capa límite tenderán a crear vórtices más fuertes comparados a los vórtices que pueden generarse cuando están sumergidos en toda la capa límite. [3]

Un adecuado espaciamiento entre los generadores de vórtices garantizará una buena distribución de sus efectos a lo largo de toda la superficie aerodinámica. [3]

Por todo lo expuesto nos proponemos estudiar la estela de un generador de vórtices, como elemento pasivo de control de flujo, de manera tal de poder caracterizarlo. Esto es analizar las velocidades medias, velocidades instantáneas, escalas integrales temporales y espaciales, energía en juego, intensidades de turbulencia, entre otras variables. Pretendemos que estos resultados sirvan como herramienta de diseño y toma de decisiones desde el punto de vista aerodinámico en el diseño de componentes.

2. OBJETIVO

El objetivo general del trabajo consistirá en caracterizar la estela generada por un VG (Generador de vórtices) inmerso en un flujo turbulento, instalado en una placa plana, sometiéndolo a distintos números de Re y a diferentes ángulos de ataque respecto a la corriente libre.

Como objetivo puntual se medirá la variación de velocidad en función del tiempo sobre la estela generada por el VG.

3. METODOLOGIA

Para cumplir con los objetivos propuestos planteamos un estudio experimental el cual consistirá en someter al VG, para dos Re diferentes, a distintos ángulos de ataque respecto a la corriente libre. Con el fin de caracterizar la estela generada para cada configuración, y poder cuantificar la misma, se procede a la medición en 4 planos situados aguas abajo. Esta medición, obtenida mediante un anemómetro, nos brindara una señal que contendrá los valores instantáneos de la componente longitudinal y transversal de la velocidad.

En primera instancia se establece una corriente libre correspondiente a un Re generado por una velocidad de 6 m/s y luego se incrementara la velocidad a un Re correspondiente a 9 m/s. Estas serán las velocidades de la corriente libre que inciden sobre la placa plana en la cual se desarrolla la capa límite en el que se sumerge el VG.

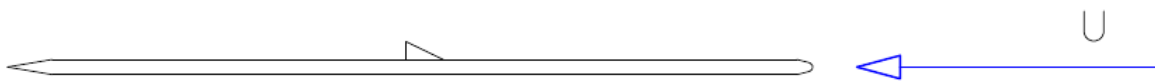


Figura 6: vista lateral de placa plana

El VG se posiciona en 3 diferentes ángulos de ataque respecto a la corriente libre correspondiente a cada Re , siendo los ángulos 0° , 15° y 30° (figura 7).

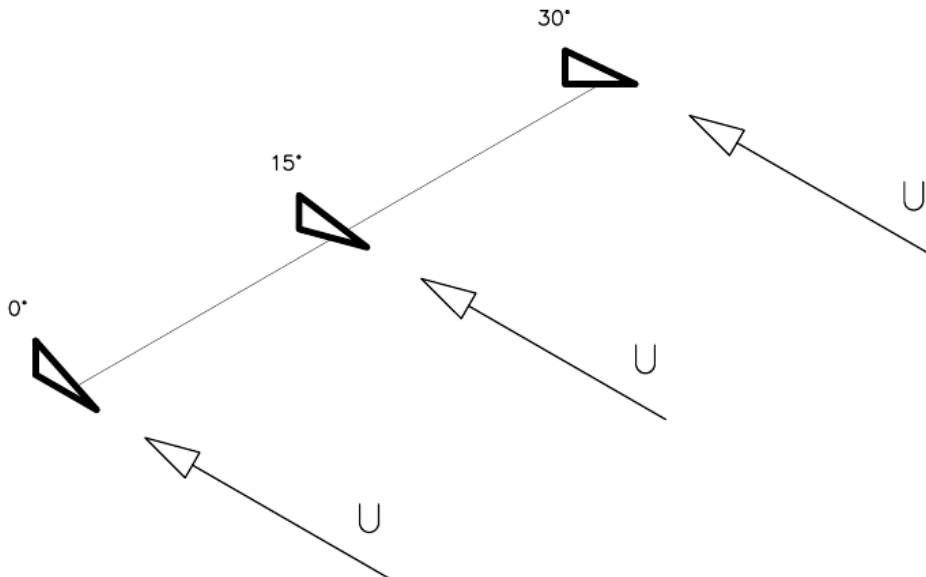


Figura 7: ángulos de ataque del VG

Para la medición del campo de velocidades detrás del VG se establecen 4 planos, en cada plano los puntos de medición conformaran una grilla los cuales aumentaran su espaciado a medida que nos situemos en un plano más alejado del VG. La configuración geométrica de los planos y las grillas se observan en figura 10.

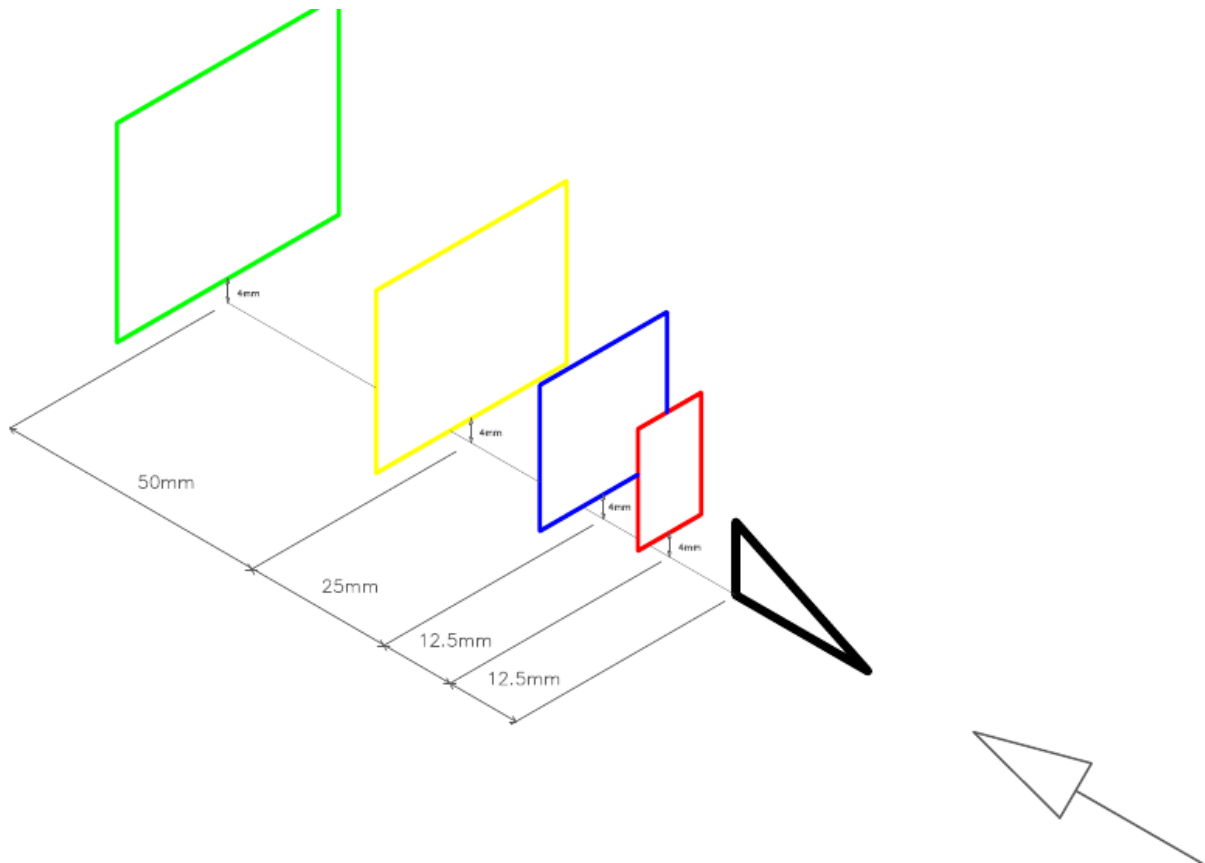


Figura 8: vista general de los planos

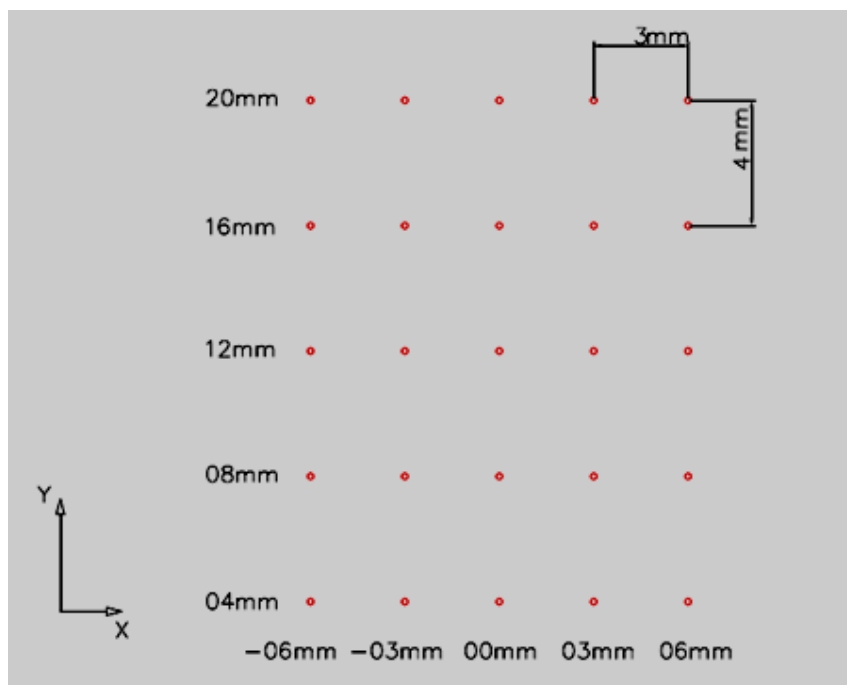


Figura 9: Plano 1

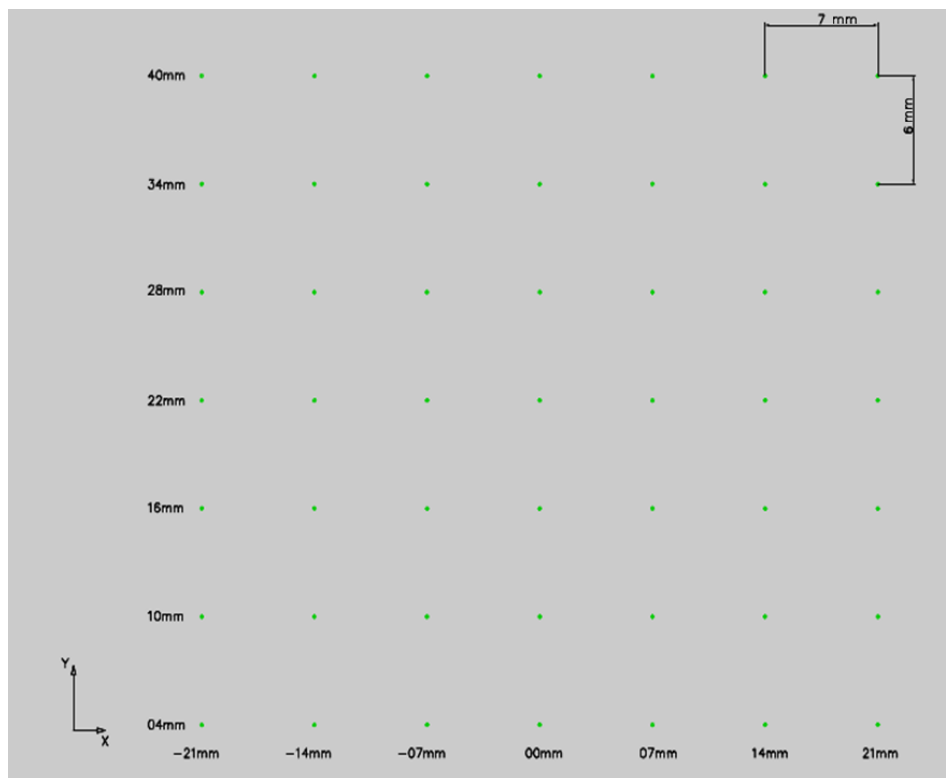


Figura 10: Plano 4

Con respecto a la medición de velocidades el anemómetro en cada punto de la grilla adquirirá en un tiempo de 8 segundos a una frecuencia de 2000Hz con un filtrado de la señal de 1000Hz, las mediciones se realizarán en dirección de la cuerda de la placa plana (en el sentido de la corriente libre) y en dirección de la envergadura de la placa plana.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1. Placa plana

Para el experimento se fabricó una placa plana rectangular de 450mm x 450mm y un espesor de 10mm, el material utilizado fue MDF (figura 11). En el borde de ataque de la placa se colocó la parte delantera de un perfil simétrico y en el borde de fuga de la placa la parte trasera del perfil, con esto disminuye la formación de turbulencias al incidir y salir de la placa la corriente libre.

En el medio de la placa se halla un agujero de 25mm de diámetro en el cual se ubicará el VG con la posibilidad de girar 360°.

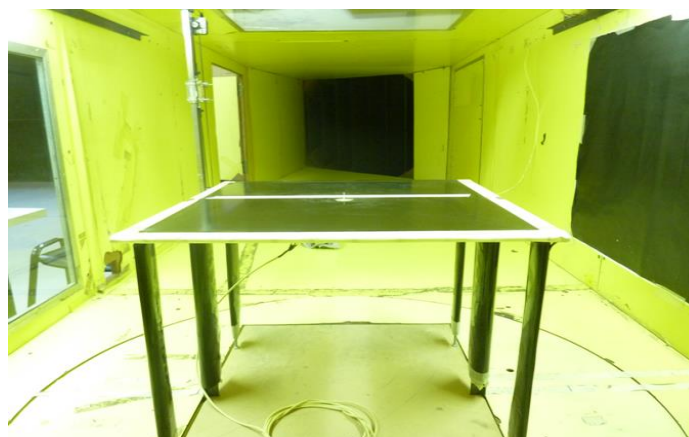


Figura 11: vista frontal

4.2. Geometría VG

El VG es del tipo convencional con una altura de 12mm y una cuerda de 24mm (figura 12), tiene 1mm de espesor (figura 13) y se fabricó a partir de una lámina de alto impacto color transparente. El VG se encuentra montado sobre un disco de MDF de 25mm de diámetro, el cual se posiciona en el medio de la placa plana con la posibilidad de girar libremente.

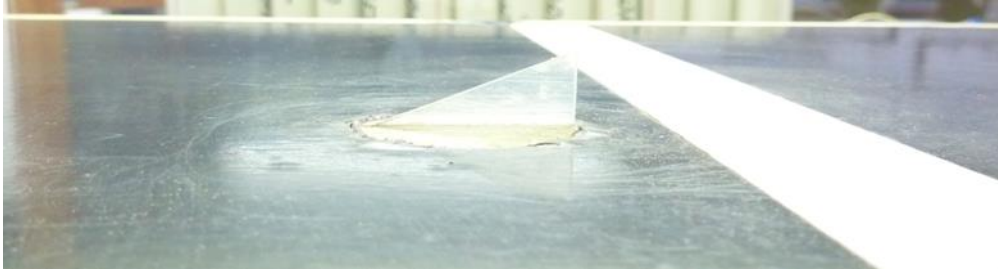


Figura 12: vista lateral del VG

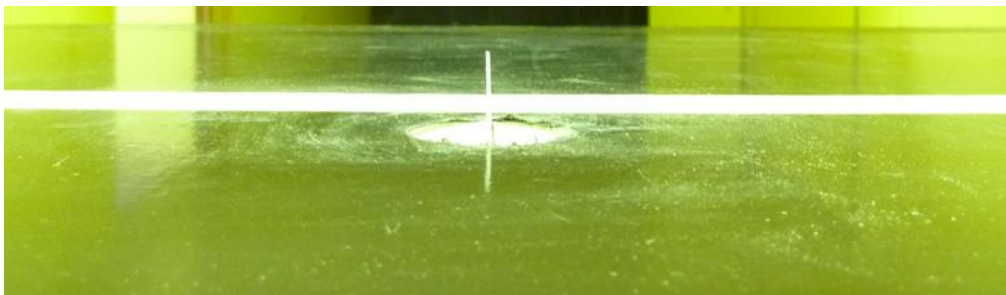


Figura 13: vista frontal del VG

Para posicionar el VG en diferentes ángulos de incidencia respecto a la corriente libre se utilizará un motor paso a paso (figura 14), con el cual, a través de una reducción con engranajes se llega a obtener una resolución de 1° .



Figura 14: mecanismo de posición del VG

5. PROCESAMIENTO DE DATOS

A continuación se mencionan aquellas variables y funciones consideradas para la caracterización del flujo turbulento con el fin de poder analizar y lograr cuantificar el efecto producido por el VG en el flujo ubicado detrás del mismo.

5.1. Escala de turbulencia

La escala turbulenta nos permite caracterizar de forma cuantitativa el movimiento del flujo turbulento brindando una medida de la región sobre la cual las velocidades están correlacionadas y una duración temporal sobre la cual las velocidades se mantienen correlacionadas. Estas medidas se denominan escala espacial y temporal respectivamente y para obtenerlas se analiza la función de autocorrelación.

Se utilizan distintos criterios para obtener las escalas predominantes en el patrón de flujo, en este caso se utilizó el criterio de corte 1/e. Es decir se toma como escala predominante en el flujo el tiempo para el cual la función autocorrelación llega al valor de 1/e.

5.2. Intensidad de turbulencia

Una variable importante para caracterizar la turbulencia es la intensidad de turbulencia IT cuya magnitud relaciona la energía contenida en la fluctuación de la velocidad con la velocidad media.

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (1)$$

5.3. Velocidad media

Este resulta uno de los parámetros más característicos del flujo, y es el promedio de la señal.

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(i) \quad (2)$$

5.4. Densidad espectral PSD

La densidad espectral o PSD es una función matemática que informa como está distribuida la energía en las distintas frecuencias de funciones armónicas que la forman.

Al aplicar la PSD a cada punto de la grilla se espera obtener, para los puntos donde la intensidad de turbulencia aumenta, una ganancia y/o un rango de frecuencias mayor con respecto al obtenido cuando el VG se encuentra a 0°. Además se podrá observar si existe para la señal algún armónico dominante para una determinada frecuencia, valor que se podría tomar para caracterizar el vórtice en ese punto.

6. RESULTADOS

Debido a la gran cantidad de datos adquiridos solo se mostraran los resultados de las mediciones en dirección transversal a la placa correspondientes a una velocidad incidente de 6 m/seg sobre los planos 1 y 4, los cuales se consideran suficientes para evidenciar la influencia del VG sobre el flujo situado detrás del mismo. Si se desea ver la totalidad de los datos procesados dirigirse a la referencia [4].

6.1. Gráficos de la velocidad media en la dirección transversal

En el título de cada imagen se especifica la velocidad incidente y la posición en que se encuentra el generador de vórtice por medio de la denominación Vel y G respectivamente.

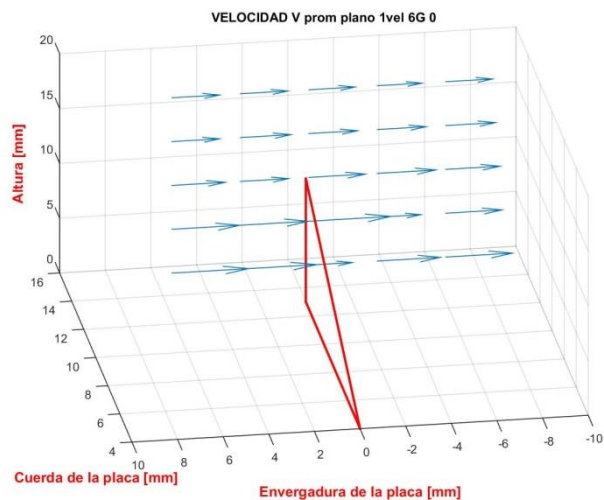


Figura 15: Componente transversal de velocidad media P1 Vel6m/s G0°

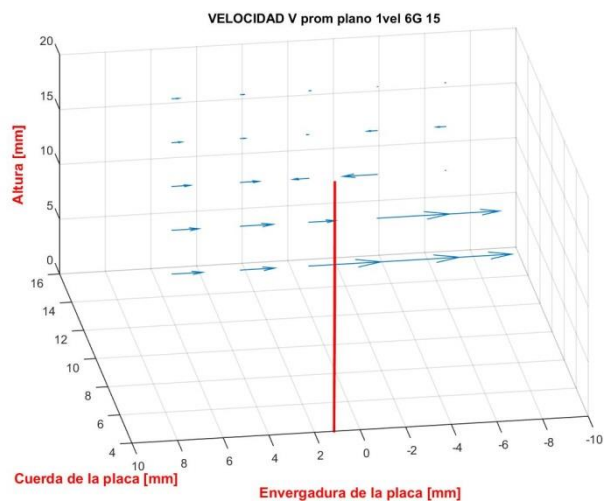


Figura 16: Componente transversal de velocidad media P1 Vel6m/s G15°

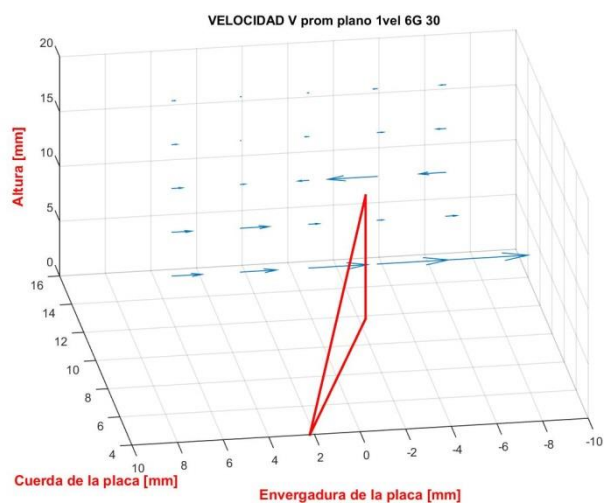


Figura 17: Componente transversal de velocidad media P1 Vel6m/s G30°

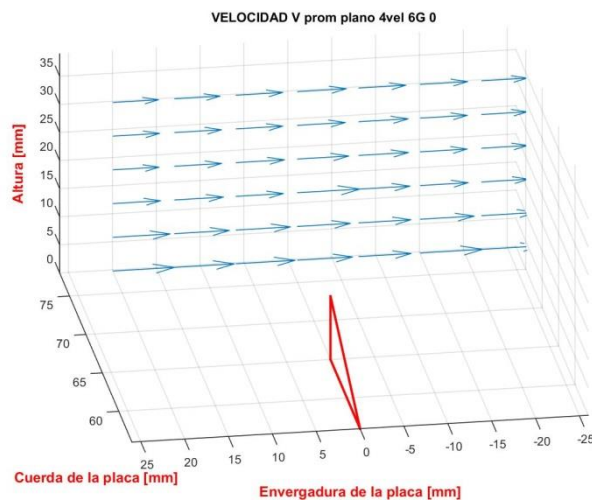


Figura 18: Componente transversal de velocidad media P4 Vel6m/s G0°

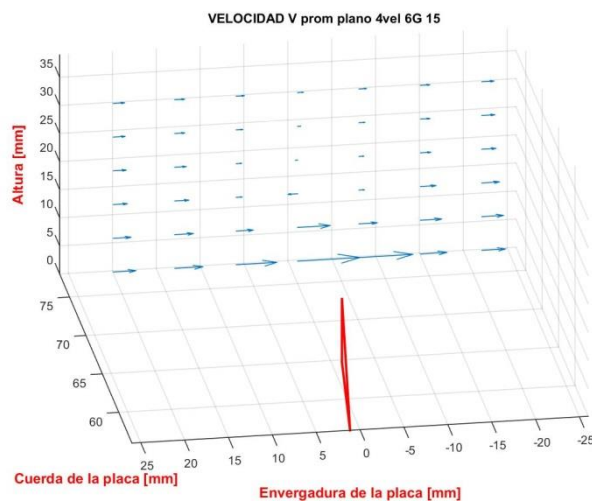


Figura 19: Componente transversal de velocidad media P4 Vel6m/s G15°

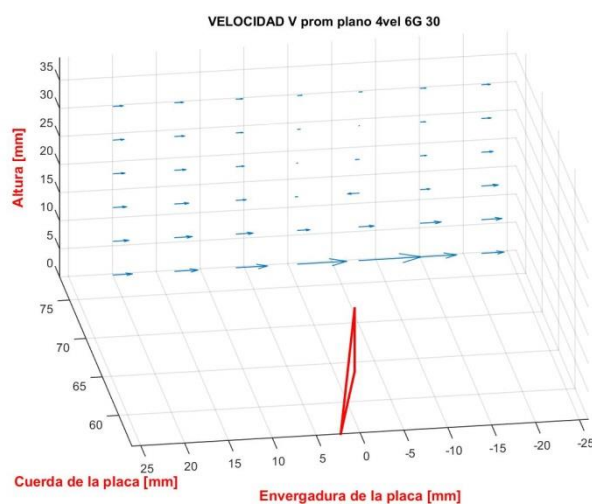


Figura 20: Componente transversal de velocidad media P4 Vel6m/s G30°

6.2. Intensidad de turbulencia

A continuación se representa la intensidad de turbulencia en función de la posición en el plano. El eje horizontal corresponde a la envergadura de la placa plana donde el cero coincide con la ubicación del VG, el eje vertical corresponde a la altura respecto a la placa plana.

Para diferenciar los distintos valores de la intensidad de turbulencia se la gráfica tomando como referencia una escala de colores donde el color verde representan los valores de magnitudes más grandes.

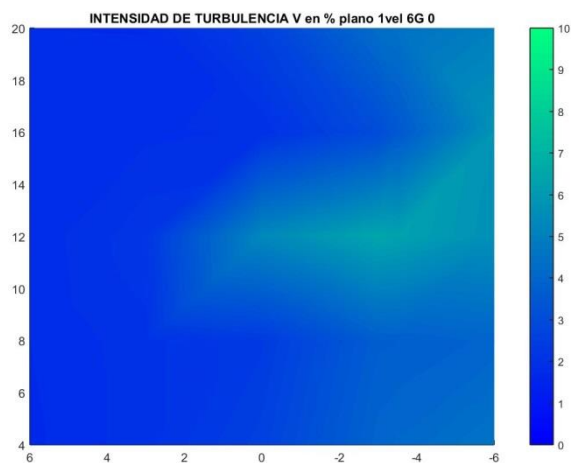


Figura 21: IT de la componente transversal de la señal (Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

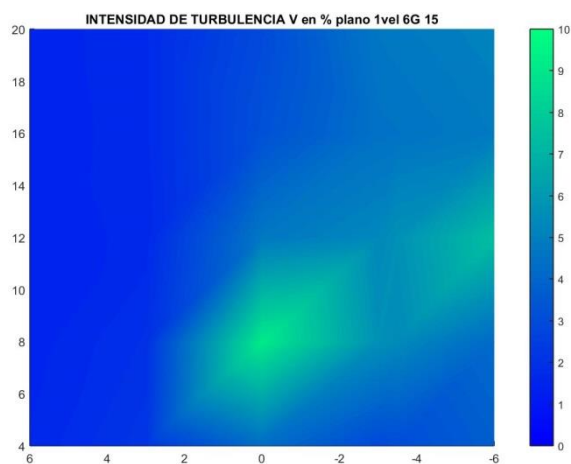


Figura 22: IT de la componente transversal de la señal(Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

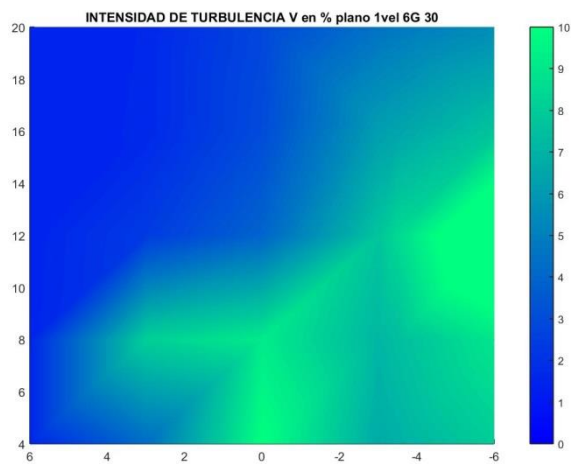


Figura 23: IT de la componente transversal de la señal(Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

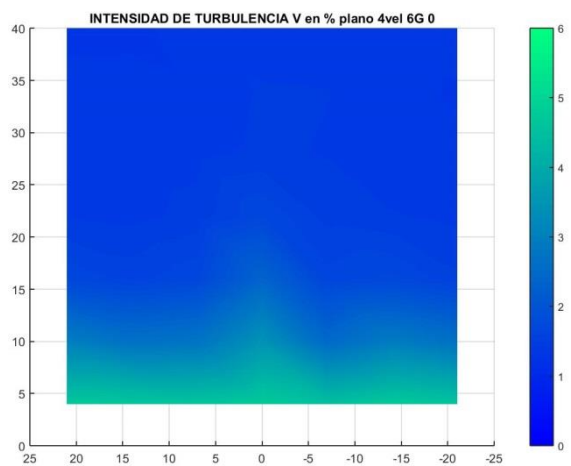


Figura 24: IT de la componente transversal de la señal(Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

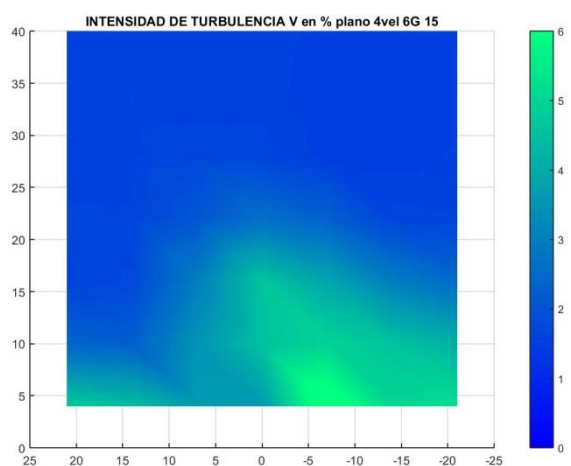


Figura 25: IT de la componente transversal de la señal(Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

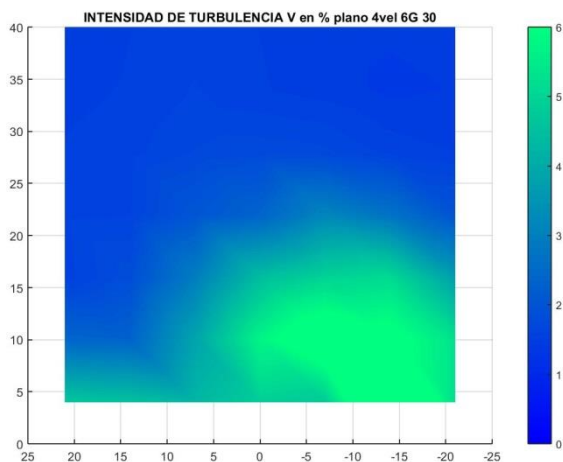


Figura 26: IT de la componente transversal de la señal(Eje horizontal X[mm], eje vertical Y[mm])

6.3. Escala de turbulencia

Se realizaron tablas donde se representan los valores de las escalas características de turbulencia en función de la posición en el plano, obtenidas a partir de la autocorrelación, mediante el criterio de 1/e, y la teoría del flujo congelado.

Escala temporal [seg] P1vel6G0					
0,006	0,007	0,006	0,0065	0,0055	20
0,0045	0,006	0,0065	0,006	0,0055	16
0,0015	0,002	0,001	0,002	0,0015	12
0,0015	0,0015	0,001	0,0015	0,0015	8
0,0015	0,0015	0,001	0,0015	0,0015	4
6	3	0	-3	-6	X\Y (mm)
Escala espacial [cm] P1vel6G0					
3,6	4,2	3,6	3,9	3,3	20
2,7	3,6	3,9	3,6	3,3	16
0,9	1,2	0,6	1,2	0,9	12
0,9	0,9	0,6	0,9	0,9	8
0,9	0,9	0,6	0,9	0,9	4
6	3	0	-3	-6	X\Y (mm)

Tabla 1: Escalas de turbulencia plano 1 G 0°

Escala temporal [seg] P1vel6G15					
0,005	0,005	0,0055	0,0055	0,0055	20
0,0035	0,004	0,004	0,003	0,006	16
0,0015	0,0015	0,001	0,0015	0,001	12
0,0015	0,0015	0,001	0,0015	0,001	8
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	4
6	3	0	-3	-6	X\Y (mm)
Escala espacial [cm] P1vel6G15					
3	3	3,3	3,3	3,3	20
2,1	2,4	2,4	1,8	3,6	16
0,9	0,9	0,6	0,9	0,6	12
0,9	0,9	0,6	0,9	0,6	8
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	4
6	3	0	-3	-6	X\Y (mm)

Tabla 2: Escalas de turbulencia plano 1 G 15°

Escala temporal [seg] P1vel6G30					
0,005	0,005	0,005	0,0055	0,005	20
0,0035	0,0045	0,002	0,0015	0,0015	16
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	12
0,0015	0,0015	0,001	0,0015	0,0015	8
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	4
6	3	0	-3	-6	X\Y [mm]
Escala espacial [cm] P1vel6G30					
3	3	3	3,3	3	20
2,1	2,7	1,2	0,9	0,9	16
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	12
0,9	0,9	0,6	0,9	0,9	8
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	4
6	3	0	-3	-6	X\Y [mm]

Tabla 3: Escalas de turbulencia plano 1 G 30°

Escala temporal [seg] P4vel6G0							
0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	40
0,0045	0,0045	0,0055	0,006	0,005	0,005	0,0045	34
0,0055	0,005	0,0055	0,0065	0,005	0,005	0,005	28
0,0055	0,006	0,006	0,0055	0,0055	0,005	0,0055	22
0,0045	0,0035	0,004	0,0015	0,004	0,0045	0,0035	16
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	10
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]
Escala espacial [cm] P4vel6G0							
3	3	3	3	2,4	2,4	40	
2,7	2,7	3,3	3,6	3	3	2,7	34
3,3	3	3,3	3,9	3	3	3	28
3,3	3,6	3,6	3,3	3,3	3	3,3	22
2,7	2,1	2,4	0,9	2,4	2,7	2,1	16
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	10
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]

Tabla 4: Escalas de turbulencia plano 4 G 0°

Escala temporal [seg] P4vel6G15							
0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,005	0,0045	0,005	40
0,0045	0,005	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	34
0,0045	0,005	0,0055	0,005	0,0045	0,005	0,0045	28
0,0045	0,0045	0,005	0,0015	0,0015	0,0035	0,0045	22
0,0045	0,005	0,002	0,0015	0,0015	0,0015	0,002	16
0,002	0,002	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	10
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]
Escala espacial [cm] P4vel6G15							
2,7	2,7	2,7	2,7	3	2,7	3	40
2,7	3	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	34
2,7	3	3,3	3	2,7	3	2,7	28
2,7	2,7	3	0,9	0,9	2,1	2,7	22
2,7	3	1,2	0,9	0,9	0,9	1,2	16
1,2	1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	10
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]

Tabla 5: Escalas de turbulencia plano 4 G 15°

Escala temporal [seg] P4vel6G30							
0,0045	0,004	0,005	0,0045	0,005	0,0045	0,0045	40
0,004	0,004	0,0055	0,005	0,005	0,004	0,0045	34
0,0045	0,0045	0,005	0,0055	0,004	0,0035	0,004	28
0,005	0,004	0,006	0,003	0,0015	0,0015	0,0025	22
0,004	0,0025	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	16
0,002	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	10
0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,002	0,0015	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]
Escala espacial [cm] P4vel6G30							
2,7	2,4	3	2,7	3	2,7	2,7	40
2,4	2,4	3,3	3	3	2,4	2,7	34
2,7	2,7	3	3,3	2,4	2,1	2,4	28
3	2,4	3,6	1,8	0,9	0,9	1,5	22
2,4	1,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	16
1,2	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	10
0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	0,9	4
21	14	7	0	-7	-14	-21	X\Y [mm]

Tabla 6: Escalas de turbulencia plano 4 G 30°

6.4. Densidad espectral PSD

En esta sección se realiza, para la señal obtenida al medir la componente transversal de la velocidad, la representación gráfica de la PSD para los puntos donde se detectan diferentes valores de la intensidad de turbulencia. En el título de cada imagen se especifica el plano y las coordenadas del punto para la cual se efectúa

la PSD. La grafica azul corresponde para una posición del generador de vórtices de 0°, la roja para 15° y la amarilla para 30°.

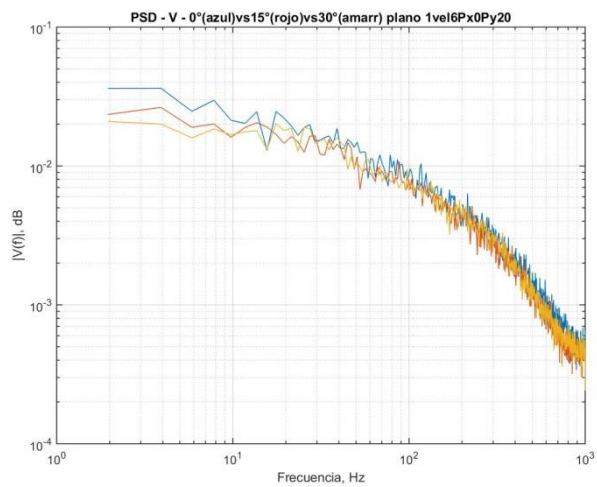


Figura 27: PSD para 0°, 15° y 30°

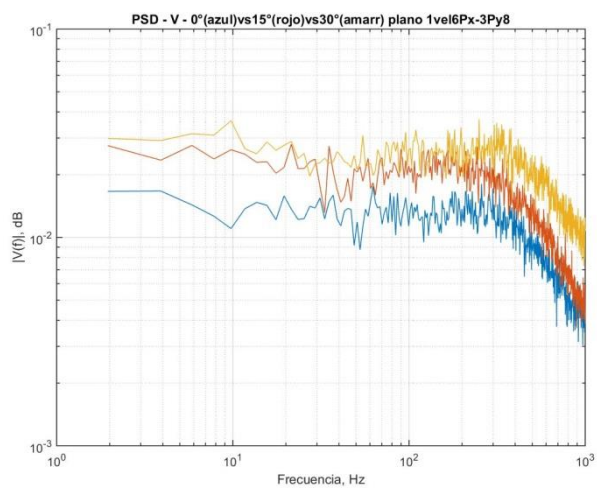


Figura 28: PSD para 0°, 15° y 30°

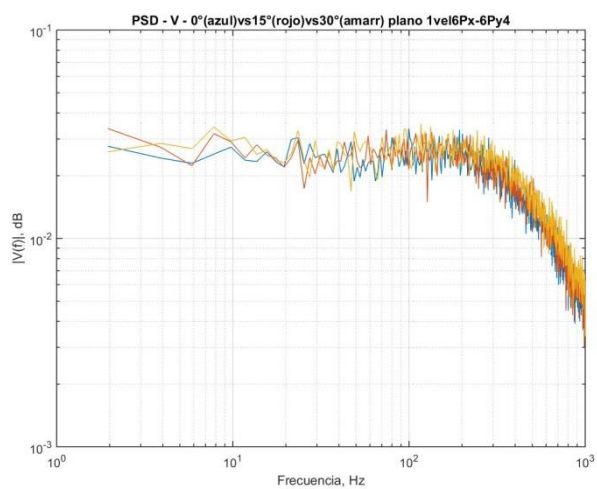


Figura 29: PSD para 0°, 15° y 30°

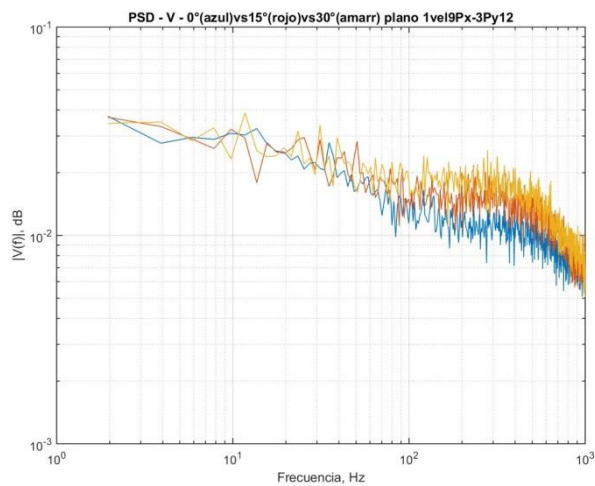


Figura 30: PSD para 0°, 15° y 30°

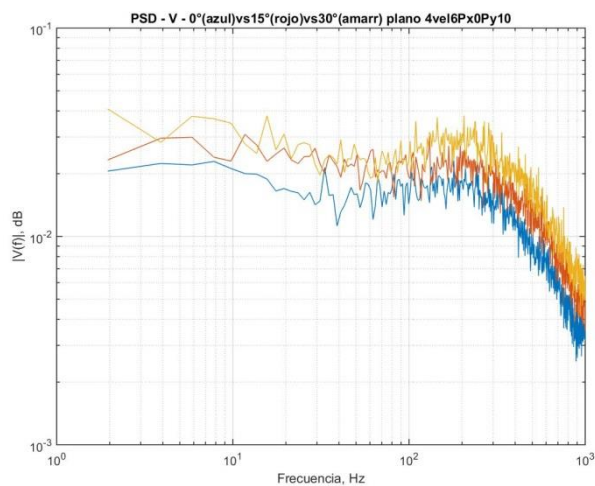


Figura 31: PSD para 0°, 15° y 30°

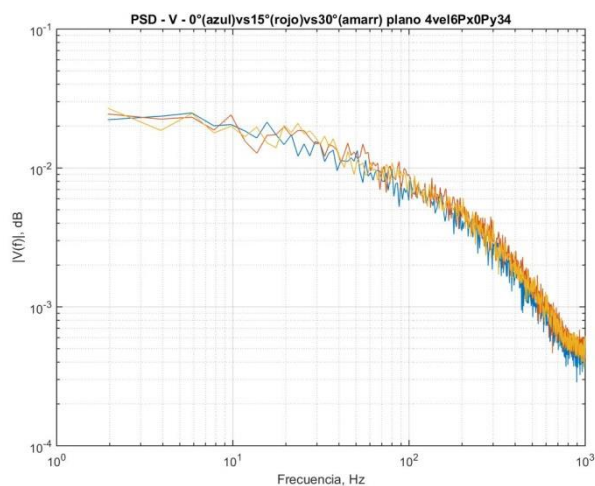


Figura 32: PSD para 0°, 15° y 30°

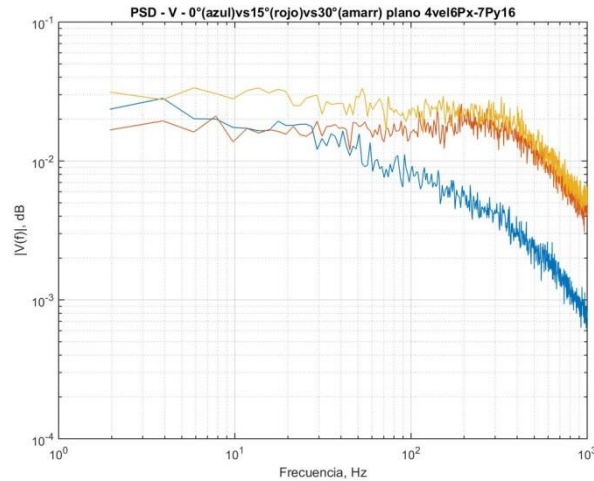


Figura 33: PSD para 0°, 15° y 30°

Si se comparan las PSDs obtenidas con las coordenadas correspondientes en los planos de intensidad de turbulencia se puede observar que en aquellos puntos donde la PSD muestra un incremento de la ganancia también se observa un incremento de la intensidad de turbulencia.

6.5. Zona de influencia

Se denomina zona de influencia del VG a la zona conformada por los puntos, en los distintos planos, en los cuales las variables que caracterizan la turbulencia del flujo sufren variaciones considerables, de acuerdo a un determinado criterio. Estas variables son la IT, la escala espacial L y la energía, calculadas en los puntos de cada plano.

Para la IT el criterio utilizado consistió en tomar los puntos en los cuales se observa un incremento de al menos un 5% tomando como referencia la condición en la cual el VG se encuentra a 0°.

En el caso de la escala espacial el criterio es diferente, como se vio en la sección ESCALA ESPACIAL el tamaño del vórtice característico creado por el VG posee un valor aproximado de 1 cm y en las zonas donde no estaría influyendo de manera importante el tamaño del vórtice es de 3 cm o más. Teniendo en cuenta esto último se establece un criterio en el cual se considera zona de influencia, referida a la escala espacial, a los puntos del plano donde el tamaño del vórtice característico sufre un decremento en su valor de, al menos, un 50% con respecto a la condición de 0°.

Con respecto a la energía se observó, en la sección PSD, que los puntos donde esta aumenta se corresponden a los puntos donde la IT se incrementa. Por lo dicho se dice que la zona de influencia, en referencia a la energía, es igual a la obtenida para la IT.

Con todo este análisis se podrá cuantificar la zona de influencia de cada variable lo cual nos brindara un medio para poder caracterizar la estela producida por el VG para cada condición.

En la tabla 7 se resume una aproximación del tamaño de la zona de influencia, para cada variable, del VG en base a los criterios realizados en la sección anterior. Todos los resultados son expresados en función de la cuerda del VG la cual posee un valor de 25 mm.

Intensidad tur					
Vel 6m/s G15			Vel 6m/s G30		
	Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical		Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical
Plano 1	0,32 c	0,64 c	Plano 1	0,46 c	0,8 c
Plano 2	0,56 c	0,72 c	Plano 2	0,64 c	0,88 c
Plano 3	0,88 c	0,72 c	Plano 3	1,2 c	0,92 c
Plano 4	1,2 c	0,92 c	Plano 4	1,28 c	1,04 c
escala espacial V *					
Vel 6m/s G15			Vel 6m/s G30		
	Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical		Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical
Plano 1	0,08 c	0,64 c	Plano 1	0,32 c	0,72 c
Plano 2	0,32 c	0,72 c	Plano 2	0,72 c	0,96 c
Plano 3	0,48 c	0,72 c	Plano 3	1,2 c	0,96 c
Plano 4	1 c	0,88 c	Plano 4	1,2 c	0,96 c

Tabla 7: Zona de influencia 1

Vel 9m/s G15			Vel 9m/s G30		
	Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical		Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical
Plano 1	0,36 c	0,64 c	Plano 1	0,48 c	0,8 c
Plano 2	0,68 c	0,88 c	Plano 2	0,72 c	0,96 c
Plano 3	0,88 c	0,8 c	Plano 3	1,2 c	0,88 c
Plano 4	1,28 c	0,92 c	Plano 4	1,24 c	1,04 c
Vel 9m/s G15			Vel 9m/s G30		
	Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical		Tamaño Horizontal	Tamaño Vertical
Plano 1	0,16 c	0,68 c	Plano 1	0,32 c	0,72 c
Plano 2	0,6 c	0,72 c	Plano 2	0,72 c	0,96 c
Plano 3	0,32 c	0,72 c	Plano 3	1,12 c	0,88 c
Plano 4	1 c	0,8 c	Plano 4	1,28 c	1 c

Tabla 8: Zona de influencia 2

7. CONCLUSIONES

Se logró establecer dimensiones para cada zona de influencia correspondiente a las variables referidas a la caracterización de la turbulencia del flujo.

Del análisis de la zona referida a la IT se puede concluir que la misma incrementa su tamaño horizontal a medida que nos alejamos del VG, en cuanto al tamaño vertical no se apreciaron variaciones importantes.

Respecto a la IT su valor máximo se sitúa en el plano más cercano al VG, a medida que nos alejamos del mismo su valor medio disminuye siendo el mismo, en el plano 4 ubicado a 10 cm, mucho más bajo respecto al primer plano. Esto último significa que en el plano más alejado pueden existir puntos donde el valor de la IT es el mismo que el del primer plano pero, en referencia a la cantidad de puntos que tengan este valor, serán muy menores.

A medida que el ángulo de ataque del VG pasa a un valor más grande se observó un incremento tanto en el tamaño de la zona de influencia como en el valor absoluto de la IT.

En las secciones anteriores se estableció que la energía calculada por la función PSD se correspondía con la IT. Con esta aclaración podemos establecer que la zona de influencia de la intensidad de turbulencia incrementa su tamaño a medida que nos alejamos del VG, en contra partida la energización brindada por este disminuye.

En cuanto a la escala espacial generada por el VG se pudo establecer que su tamaño es próximo a la altura del mismo. Se obtuvo una zona donde se observan los cambios de escala aunque el tamaño de la misma no fue establecido con la precisión lograda para la IT debido a la dificultad para la identificación de estos cambios principalmente por la presencia de la capa límite en las cercanías de la placa plana.

Se observa que la componente transversal de la velocidad ubicada dentro de la zona de influencia sufre, en cercanías a la placa plana, una intensificación notoria de su magnitud y, en una ubicación más elevada dentro de la zona, un cambio de dirección. Esto evidencia la existencia de un fenómeno rotatorio dentro de la componente transversal del campo de velocidades. Este cambio de sentido en la componente transversal sucede para todos los casos en una ubicación fuera de la capa límite. La zona en la cual se hace presente el fenómeno rotatorio va decreciendo a medida que nos alejamos del VG pero se logra incrementar a medida que aumenta el ángulo de ataque y se incrementa la velocidad de la corriente libre.

Finalmente para la relación entre el número de Re y las distintas zonas se aprecia que, en referencia al tamaño, un aumento poco significativo y, en referencia a la magnitud de las variables, un aumento de su valor apreciable.

En conclusión se pudo establecer, para las distintas variables de turbulencia, la zona de influencia la cual permitió la caracterización de la estela generada por el VG.

REFERENCIAS

[1] Dr. H Schlichting; *Teoría de la capa límite 5ta edición*

[2] Gad-el-Hak, M. (2000). *Flow control: Passive, Active and Reactive Flow Management. Cambridge Univ. Press.* ISBN 0 521 77006 8.

[3] Ramirez Puente, A.J “Uso de micro generadores de vortices para incrementar la autoridad de las superficies de control“

[4] Mantelli Pablo, “Caracterización de la estela de un generador de vortices inmerso en una corriente turbulenta“