



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE SONDAS DIRECCIONALES MULTIAGUJERO

J. Ruscio^a, M. Aguirre^a, F. Santonja^a, B. Domecq^a, M. Saavedra Sanchez^a, M. Vicharelli^a, E. Fernandez Vescovo^a, V. Caballini^a, C. Olmedo^a

^aLAYF (Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos) - Departamento de Ingeniería Aeronáutica - Facultad Regional Haedo
Universidad Tecnológica Nacional - Paris 532 – Haedo - CP1706 - Bs. As – Argentina www.frh.utn.edu.ar

Palabras claves: Sondas Direccionales, Presión, Velocidad, Calibración, Túnel de Viento

Resumen

El objetivo del proyecto es la construcción y calibración de sondas direccionales multiagujero para ensayos en túnel de viento. Este instrumento permite medir las presiones total y estática, así como las 3 componentes del vector velocidad en un punto de la corriente.

El trabajo describe el proceso de construcción de las sondas direccionales de 2, 3, 5 y 7 agujeros. También se describe la construcción de un túnel de viento de calibración, el cual permite obtener la calidad de flujo adecuada para la calibración de las sondas direccionales en régimen incompresible. Asimismo, se detalla el diseño y construcción del utillaje de calibración de 2 grados de libertad: se trata de un dispositivo de posicionamiento de sondas que permite mantener la punta de la sonda fija en el espacio variando dos grados de libertad angulares, con el fin de cubrir un rango de ángulos de ataque y de deslizamiento entre -50° y $+50^\circ$. Por último, se describe el sistema de adquisición de datos en tiempo real, desarrollado para la automatización del sistema de posicionamiento y las mediciones de presión. El mismo permite determinar el mapa de calibración de la sonda durante el transcurso del ensayo.

Como resultado de este proyecto, se logró la independencia y flexibilidad del laboratorio en la construcción y calibración de sondas direccionales ya que se desarrolló el ciclo completo. Esto permitió obtener un producto a muy bajo costo y ofrecer en el mercado nacional una alternativa a los productos extranjeros.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Necesidad de desarrollo de sondas direccionales

Una campaña de ensayos en túnel de viento incluye normalmente una serie de mediciones con balanza a efectos de determinar las curvas características de una maqueta. Posteriormente se realizan ensayos complementarios con vistas a obtener información cuantitativa y cualitativa adicional que permita comprender la física del problema estudiado. Este es el caso de las mediciones de presiones superficiales, visualización de flujo, etc. Sin embargo, resulta de gran interés obtener información fuera de la superficie del modelo para lo cual se realizan mapeos alrededor del mismo. Esto se efectúa idealmente con técnicas no intrusivas como velocimetría láser pero las mismas no permiten acceder a la presión total y estática local del flujo. Es por ello que resulta indispensable contar con sondas direccionales pues estas permiten medir en un punto tanto las 3 componentes de velocidad como la presión total y estática.

Este instrumento es de construcción simple sin embargo su costo es alto, especialmente si se consideran las reparaciones que deben sufrir a lo largo de su vida útil. Asimismo, las sondas direccionales no se fabrican en el país, lo que dificulta su adquisición y su masificación en la industria nacional. Estas adversidades no obstante fueron vistas como una oportunidad por el LAYF ya que las capacidades adquiridas permitían afrontar el diseño, construcción y calibración de sondas direccionales con vistas a generar una alternativa nacional.

Esto dio origen a un proyecto de investigación y desarrollo (PID) homologado por el rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional (PID AMUTN 3610: Medición de Fuerzas y Momentos de Origen Aerodinámico). Uno de sus objetivos es el desarrollo de sondas direccionales para su posterior aplicación en:

- mediciones de campo lejano (Tomografías).
- medición indirecta de fuerzas en maquetas mediante integración de estela.
- anemometría para vehículos aéreos no tripulados (UAV).

1.2. Aplicación en túnel de viento

Para el caso de las tomografías, durante el ensayo en túnel de viento se monta la sonda en un sistema de posicionamiento cartesiano. Este equipo permite ubicar a la sonda en diversos puntos del plano YZ por detrás de la maqueta. Las componentes del vector velocidad " \vec{V} " que mide la sonda son referidas al sistema de coordenadas indicadas en la Figura 1 y vienen dadas por la ecuación (1):

$$\vec{V} = V_x \hat{i} + V_y \hat{j} + V_z \hat{k} \quad (1)$$

En donde el eje X corresponde al eje del túnel de viento.

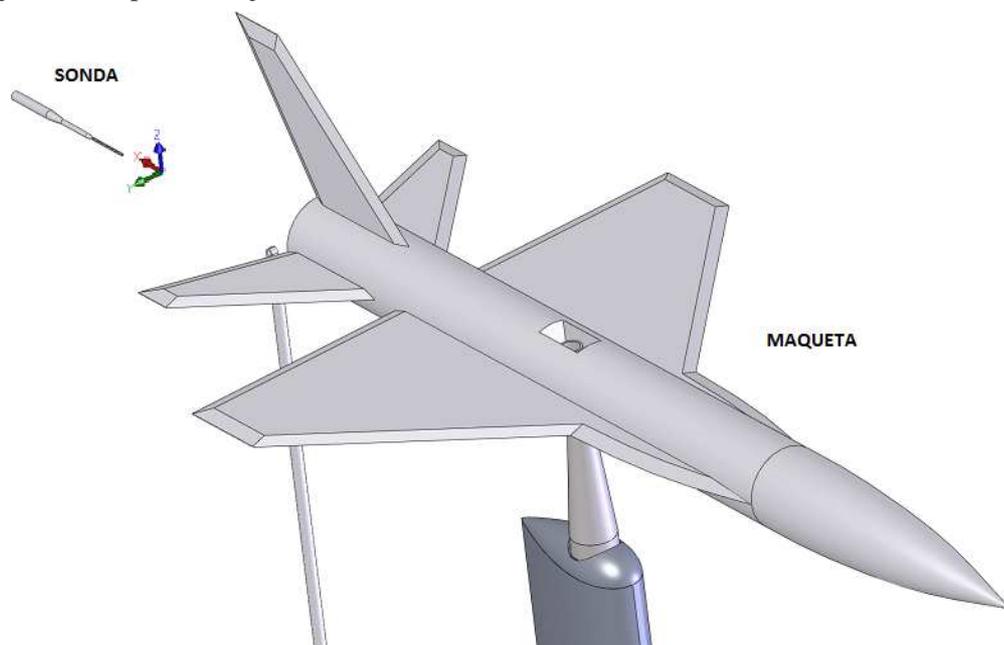


Figura 1: sistema de referencia del túnel de viento

En este sistema de referencia se definen los ángulos de flujo locales (medidos en la cabeza de la sonda) como se indica en la ecuación (2):

$$\begin{aligned}\alpha &= \text{ArcTan}(V_z/V_x) \\ \beta &= \text{ArcTan}(V_y/V_x)\end{aligned}\quad (2)$$

En donde “ α ” es el ángulo de ataque y “ β ” el ángulo de deslizamiento.

En la cabeza de la sonda se mide además la presión total y la estática. De esta forma es posible acceder a información de gran utilidad para efectuar el diagnóstico de flujo de un caso de estudio. El objetivo de este proyecto entonces se centra en desarrollo de sondas direccionales que puedan cumplir la función mencionada.

1.3. Alcance del estudio

Para cumplir con el objetivo mencionado, no solo se debió desarrollar la técnica de construcción de las sondas, sino que además se debieron realizar otros desarrollos en paralelo. Las actividades que se incluyen en este trabajo son las siguientes:

- Construcción del túnel de calibración y su caracterización.
- Desarrollo del banco de calibración, incluyendo su sistema de posicionamiento y sistema de adquisición de datos.
- Construcción de las sondas y su calibración.

Este trabajo se restringe a la realización de estudios en régimen incompresible únicamente y efectuando mediciones en flujo estacionario (mediciones promediadas en el tiempo).

2. TUNEL DE VIENTO DE CALIBRACION DE SONIDAS

Si bien LAyF disponía de varios túneles de viento al momento de iniciar el proyecto, se prefirió no utilizar los túneles principales para el desarrollo de este trabajo ya que los mismos se reservan para tareas de I+D. En su lugar se decidió modificar un túnel existente para convertirlo en un túnel de calibración de sondas. Esta medida apunta al hecho de que las calibraciones de sondas direccionales consumen mucho tiempo y esto implicaría tener ocupados los túneles principales durante estos periodos de ensayo. Otro factor considerado fue que los túneles existentes no contaban con las condiciones de espacio y calidad de flujo ideales para efectuar calibraciones de precisión.

2.1. Túnel de viento original

El túnel de calibración se construyó a partir de un túnel de viento ASHRAE (ver Figura 2) que originalmente había sido diseñado para ensayos de filtros de partículas.



Figura 2. Túnel de viento original para ensayo de filtros

Este túnel contaba con algunos componentes de utilidad como su ventilador, cámara de ensayos y tobera AMCA normalizada. Se partió entonces de estos componentes y se rediseñó el túnel para satisfacer las necesidades de un túnel de calibración de sondas [1]. A tal efecto se le agregaron nuevos componentes, a saber: toma de aire, cámara de tranquilización (honeycomb y set de mallas anti-turbulencia) y difusor de salida del ventilador. El resto de los componentes del túnel original fueron reutilizados en la construcción de estos componentes.

2.2. Reforma del túnel

Dado que el túnel original era de concepción modular, se valió de estos componentes desmontables para poder construir los diferentes bloques del nuevo túnel. Esto no solo representó una facilidad durante su construcción, sino que además el mismo resulta de utilidad para tareas de mantenimiento y limpieza del túnel. En particular son las mallas de la cámara de tranquilización los componentes más delicados ya que son propensos a retener partículas que comprometen su efecto uniforme en la sección.

- **Construcción de la toma de aire:**

Los labios se construyeron adoptando perfiles aerodinámicos desarrollados por el LAYF en el marco de proyectos anteriores. Para obtener estas geometrías se utilizaron cuadernas de melanina recubiertas en chapa de aluminio, rigidizadas interiormente con espuma poliuretánica expandible (ver figura 3). Este carenado se construyó alrededor de una brida metálica que se monta directamente en el frente del túnel de viento. Esto facilitó del montaje-desmontaje de la toma de aire durante las tareas de caracterización.

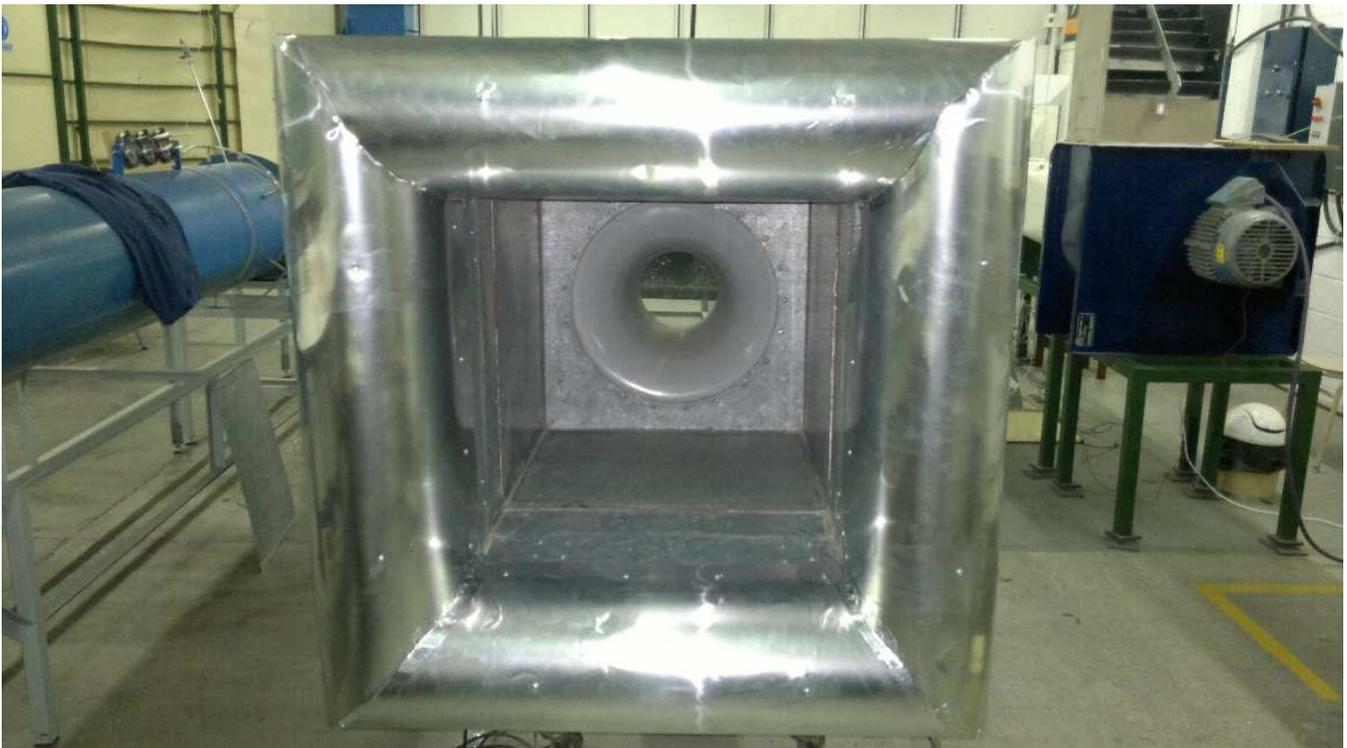


Figura 3: Detalle de la toma de aire

Abajo de la toma de aire viene la cámara de tranquilización. Esta está compuesta por un rectificador de flujo de sección tipo panal de abeja (honeycomb) y por una serie de mallas anti-turbulencia.

- **Construcción del honeycomb:**

El honeycomb metálico disponible en el mercado nacional no satisfacía nuestras necesidades de tamaño de celda y ancho de panel [1, 2], por este motivo fue necesario construir nuestro propio honeycomb. A tal fin LAYF desarrolló una matriz para plegar chapa de aluminio mediante una prensa hidráulica (ver figura 4).



Figura 4: Matriz para estampado de honeycomb.

Esta matriz consta de 2 bloques de acero que contienen dientes de metal hexagonales que engranan entre sí. Al presionar la chapa la deforman plásticamente, adoptando la forma de los canales hexagonales. Esta matriz tiene además 2 guías laterales para evitar que la chapa se distorsione lateralmente durante su deformación plástica. Asimismo, los bloques tienen un conjunto de resortes que separan las matrices luego de la compresión. Esto permite desplazar longitudinalmente la chapa y continuar con el estampado. Una vez fabricadas las chapas acanaladas, se construyó un marco metálico en uno de los paneles modulares del túnel. Las chapas fueron montadas una sobre la otra, contenidas por este marco, y pegadas entre sí con cinta bifásica (ver figura 5). Posteriormente se carenó la estructura metálica para minimizar las pérdidas de energía.



Figura 5: montaje (en curso) del honeycomb en panel desmontable

La técnica de construcción de honeycomb demostró ser simple y efectiva, con el agregado de su versatilidad, ya que la matriz puede modificarse rápidamente para adoptar dientes hexagonales de diferente tamaño y así lograr distintas medidas de honeycomb. Como contraparte, el desarrollo y puesta a punto del sistema resulta muy laborioso, pero una vez listo permite producir un panel de abeja de buena calidad, personalizado y a muy bajo costo.

- **Mallas anti-turbulencia:**

El túnel tiene 3 mallas metálicas anti-turbulencia [1, 2, 3] cuyo diámetro de alambre disminuye en el sentido del flujo de aire mientras que la porosidad aumenta en esta dirección. La primera malla (la más gruesa) está ubicada aguas arriba del honeycomb mientras que las 2 mallas restantes están montadas justo detrás del mismo. Las mallas metálicas van montadas en las bridas de unión de las secciones del túnel (ver Figura 6).



Figura 6: Detalle armado de una de las mallas finas (izquierda) y malla gruesa montada (derecha).

- **Salida de aire:**

El túnel de viento original no contaba con conducto de salida del ventilador. A máxima velocidad de operación del túnel, el chorro de descarga tiene una velocidad muy alta y por ello perturba fuertemente el campo de fluido alrededor del túnel. A efectos de reducir la velocidad del chorro de descarga y así minimizar la interacción entre este chorro y la entrada de aire al túnel, se agregó un difusor a la salida del ventilador.

Dada la falta de espacio se decidió implementar un difusor de gran ángulo de difusión. Este tipo de difusor se caracteriza por tener grandes zonas de separación de flujo indeseables. Es por ello que para mejorar la calidad de flujo se insertaron 2 tabiques internos alineados con el eje del difusor. Estos tabiques cumplen la función de bifurcar el difusor, reduciendo a la mitad el ángulo de difusión de cada conducto y ayudando a evitar la separación de flujo.

El chorro de descarga obtenido con el difusor se ralentizó considerablemente sin embargo los efectos de interacción continuaban presentes aunque en menor medida. En particular, daba la baja altura del techo del laboratorio, el chorro de descarga (que apuntaba hacia arriba) continuaba reingresando en la toma de aire. Esto se solucionó incorporando un deflector de flujo en el extremo del difusor. Se trata de una cascada de alabes [1] que desvía el flujo lateralmente 90° (ver Figura 7).

Esta estructura se construyó de forma que sea posible orientarla según diferentes direcciones de descarga del chorro. Esto resultó de utilidad durante la campaña de ensayos de caracterización del túnel, en donde se probaron diferentes direcciones de descarga para ver cuál era la que menos impactaba en la performance del túnel de viento.



Figura 7: Difusor montado en túnel (izquierda) y detalle del deflector de flujo (derecha).

- **Túnel de viento final:**

En la Figura 8 se observa el túnel de viento de calibración finalizado. En la Sección 4 (“Banco de Calibración de Sondas”) se muestra en detalle la zona de la cámara de ensayos.



Figura 8: Vista general del túnel de viento

Las características del túnel de viento de calibración son las siguientes:

- Toma de aire bi-elíptica.
- Malla metálica delantera de acero inoxidable, diámetro de alambre 0.6mm y porosidad 58.34%.

- Honeycomb de 110mm de ancho, con canal hexagonal de 6mm de lado.
- Malla metálica central de acero inoxidable, diámetro de alambre 0.4mm y porosidad 65.14%.
- Malla metálica trasera de acero inoxidable, diámetro de alambre 0.16mm y porosidad 70.86%.
- Dimensiones de la cámara de tranquilización: 600mm x 600mm.
- Diámetro de garganta de tobera AMCA: 200mm.
- Relación de contracción de la tobera AMCA: 11.5 a 1.
- Ventilador centrífugo de 15HP a 1440RPM.

2.3. Instrumental y procedimiento de caracterización

Una vez finalizada la construcción del túnel, se inició la campaña de caracterización del túnel de viento. La misma fue dividida en 2 etapas:

Campaña visualización de flujo: El objetivo fue realizar visualización de flujo por medio de inyección de humo y tomoscopia láser a efectos de recolectar información cualitativa que permita comprender el comportamiento aerodinámico de las distintas partes del túnel. Para este estudio se utilizó el equipo de tomoscopia laser desarrollado previamente en el LAyF [4].

Campaña de tomografías: El objetivo fue realizar mediciones de presión total y estática en diversos planos aguas abajo de la tobera de la cámara de ensayos. Este estudio permite determinar las características de la corriente de aire en la cámara de ensayos siguiendo los procedimientos standard [5, 6]. Estas tomografías se realizaron mediante 2 rakes, uno con 32 sondas de presión total y otro con 32 sondas de presión estática (ver Figura 9). Los mismos fueron construidos especialmente para esta actividad basados en los lineamientos indicados en las referencias [7, 8, 9].



Figura 9: Rakes de presión total (arriba) y estática (abajo)

A efectos de desplazar los rakes a lo ancho de la cámara de ensayos durante el mapeo, se los montaron en un sistema de posicionamiento transversal automático (ver Figura 10).



Figura 10: Sistema de posicionamiento del rake

En esta campaña de caracterización del túnel de viento, se implementó la técnica de “Data Fusion” [10], que es una herramienta de integración de mediciones en tiempo real en un entorno 3D y que permite seguir y analizar las mediciones a medida que se van desarrollando.

2.4. Resultados y discusión

En principio se estudiará la entrada de aire mediante inyección de humo con lanza. Como se explicó anteriormente, el chorro de descarga del ventilador sin difusor afectaba fuertemente el flujo a la entrada de aire. Esto puede apreciarse en la Figura 11 - izquierda, donde el humo inyectado delante de la toma de aire se desvía por encima de la misma en lugar de ser succionado por el túnel. Este problema fue solucionado con la fabricación del difusor de salida: al reducir la velocidad del chorro de salida del túnel y redireccionarlo hacia zonas lejanas de la entrada del mismo, se logró una mejora apreciable en el patrón de flujo de entrada. Esto puede observarse en la Figura 11- derecha.



Figura 11: sin difusor ni cascada de alabes (izquierda) – con difusor y cascada de alabes (derecha).

Una vez mejorada el patrón global del flujo de entrada, se estudió en detalle el comportamiento del labio de la toma de aire mediante tomoscopia láser. En este estudio se inyectó humo por detrás de la toma de aire (alrededor de la parte externa de la cámara de tranquilización) y se dejaba que el mismo ingrese hacia la entrada de aire rodeando al labio. Este flujo fue puesto en evidencia al cortarlo con un plano láser longitudinal (Ver figura 12). Se

pudo observar que el labio permite que la masa de aire gire 180° sin separación de capa límite (zona “1”). También puede apreciarse que las estructuras vorticosas de gran escala no se ven afectadas por el labio e ingresan directamente al túnel de viento. Es por ello que resulta fundamental contar con una cámara de tranquilización.

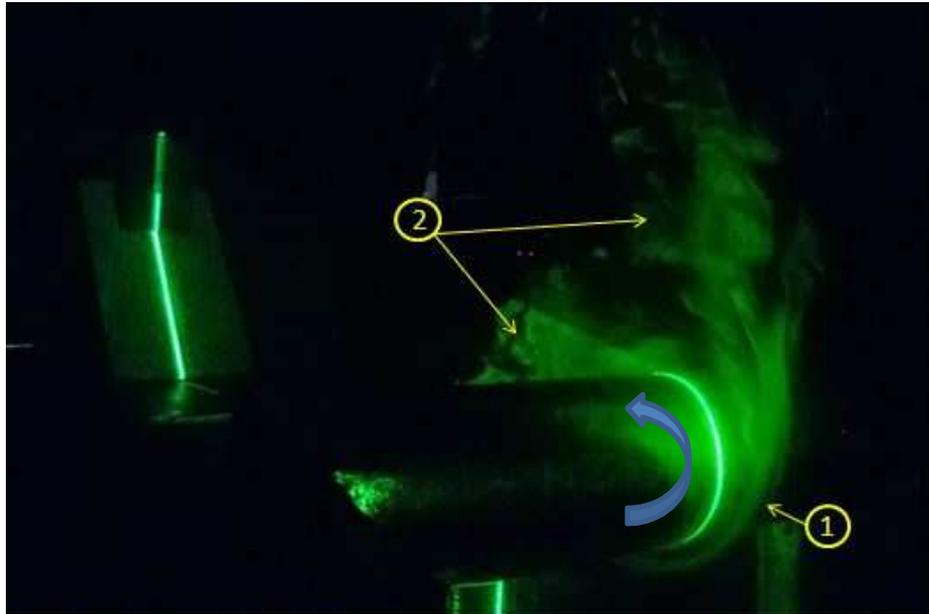


Figura 12: Tomoscopia láser en el labio de la toma de aire

El efecto de la cámara de tranquilización se estudió analizando su impacto en el patrón de flujo observado en la cámara de ensayos (plano de descarga de la tobera). Para ello se realizaron tomoscopías láser transversales al chorro de descarga de la tobera (Ver figura 13). Este plano es de suma importancia dado que en el mismo estarán contenidas las cabezas de las sondas durante su calibración.

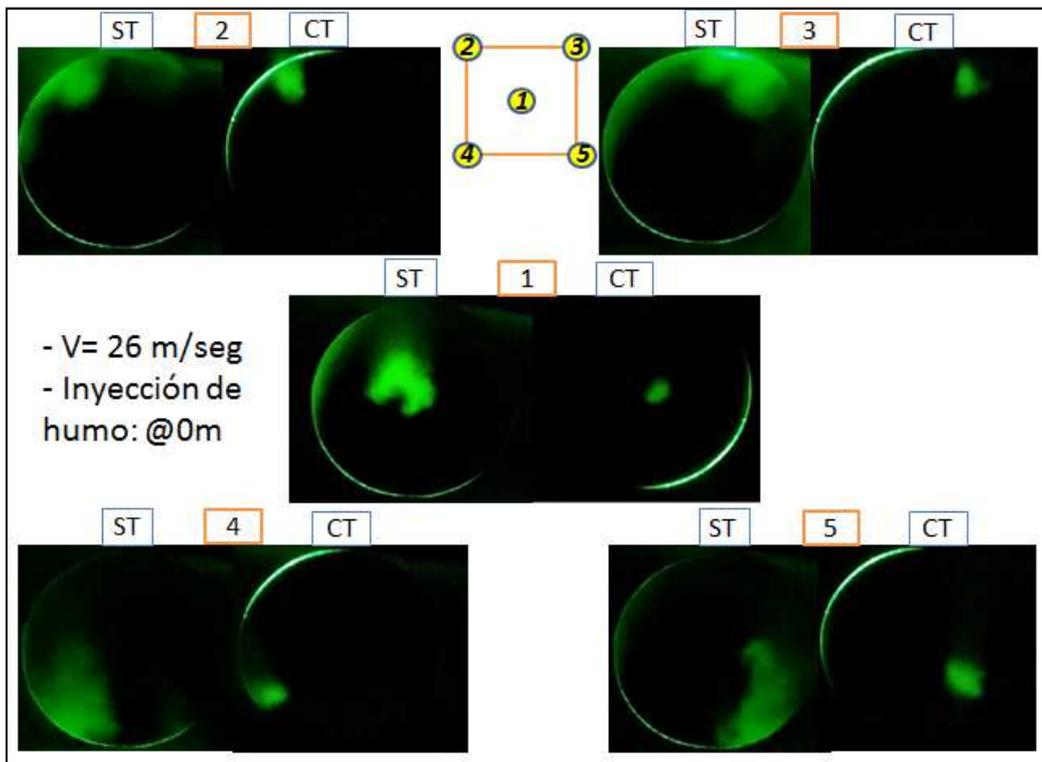


Figura 13: Tomoscopia transversal de la descarga de tobera

En este estudio se inyectó humo en 5 posiciones diferentes de la toma de aire: en el centro (Posición “1”) y en las 4 esquinas de la toma de aire (Posiciones “2”, “3”, “4” y “5”). Para cada posición de descarga de humo, se comparan las tomoscopías con y sin cámara de tranquilización (“CT” y “ST” respectivamente). Se observa claramente que gracias a la cámara de tranquilización, la masa de humo que había sido inyectada puntualmente en la toma de aire, llega concentrada a la cámara de ensayos. En cambio, sin cámara de tranquilización, la difusión turbulenta dispersa fuertemente la masa de humo. Este fenómeno disipativo es fuertemente no estacionario y de hecho sin la cámara de tranquilización la masa de humo oscilaba en su posición. Gracias a la cámara de tranquilización, el fenómeno convectivo predomina sobre el disipativo logrando una muy buena calidad de flujo en la cámara de ensayos.

Una vez finalizada la campaña de visualización de flujo se realizó el estudio de tomografía en 2 planos: sección de descarga de tobera y plano a 1 diámetro aguas abajo. Esto se observa en la Figura 14 para 2 velocidades diferentes de corriente libre (26 y 45 m/seg). Allí se observa que el chorro de descarga sufre una expansión considerable a lo largo de la cámara de ensayos, y es mas intenso a mayor velocidad. Esta apertura del chorro de descarga implica la aparición de un gradiente de presiones axiales muy fuerte lo cual eventualmente dificultaría el uso de este tunel para el ensayo de modelos ya que este gradiente de presiones axiales requiere de introducir grandes correcciones a las mediciones de balanza. No obstante en el presente estudio se preve utilizar el tunel para calibrar sondas direccionales en la sección de descarga, en donde el flujo presenta muy buenas características.

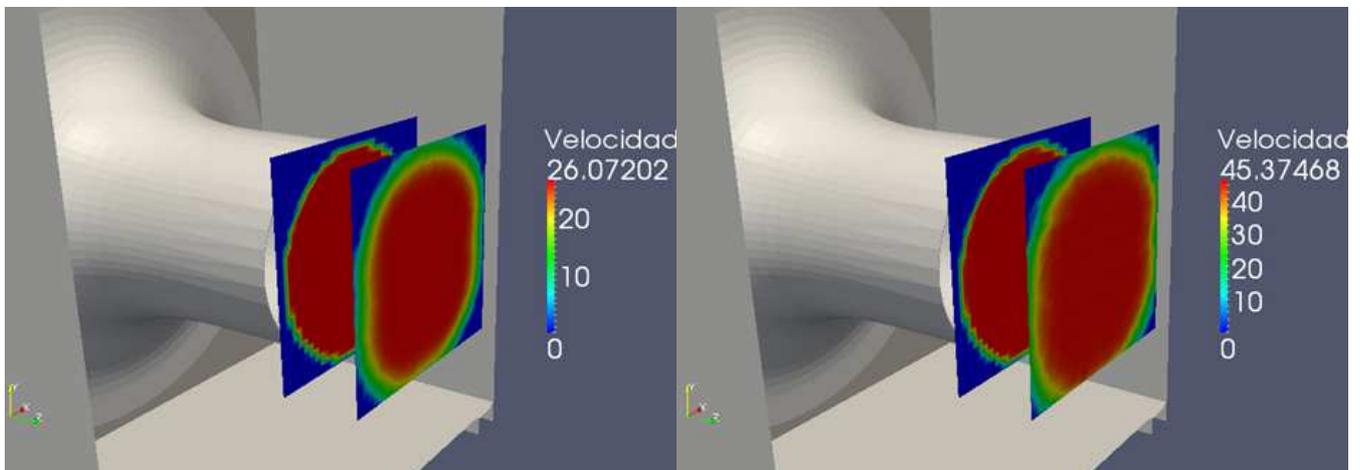


Figura 14: mapas de velocidades en [m/seg]

En cuanto a la calidad de flujo en la sección de descarga, la recomendación [1] es que el perfil de velocidades presente fluctuaciones que no superen 0.2% - 0.3% de la velocidad promedio. Como se aprecia en la figura 15, el túnel de calibración cumple con esta recomendación. En estos gráficos, la escala de colores se definió de forma que los valores máximos y mínimos mostrados estén dentro del rango $V_{\text{máxima}}$ y $V_{\text{máxima}} - 0.6\%$.

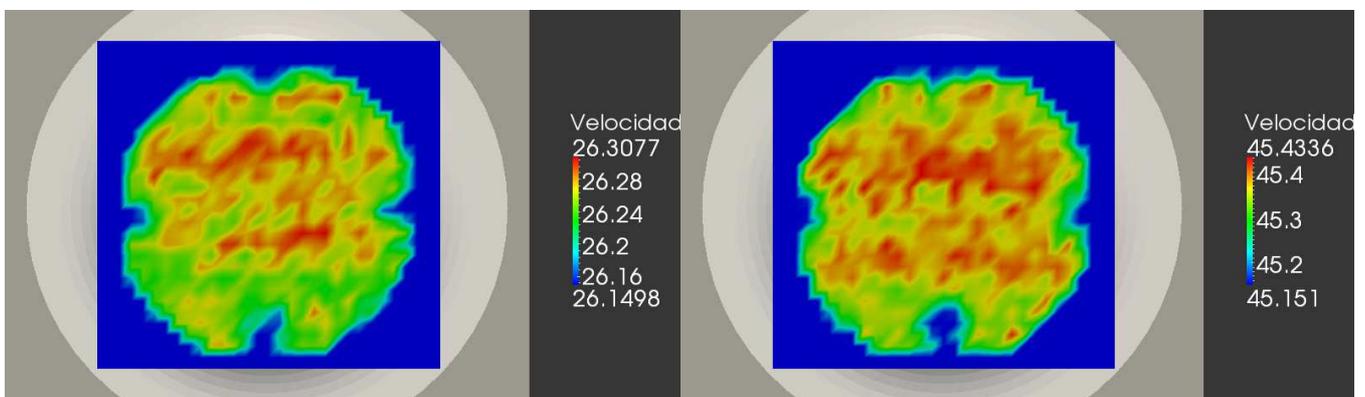


Figura 15: Tomografía de velocidades en [m/seg] en el plano de descarga de tobera

Finalmente, se colocaron 2 sondas de referencia en la tobera: una sonda total aguas arriba de la tobera (al final de la cámara de tranquilización) y una toma estática en la garganta de la tobera. Estas 2 tomas fueron montadas a efectos de conocer la velocidad en la sección de descarga midiendo simplemente esas 2 presiones. Es por ello que se utilizaron las tomografías para relacionar la velocidad real en la descarga de tobera en función de la velocidad medida con las sondas auxiliares. Esto se observa en la Figura 16.

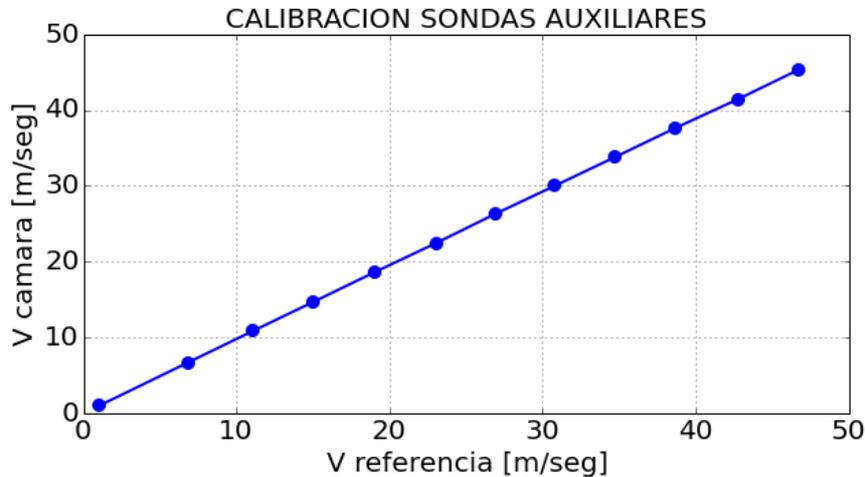


Figura 16: Velocidad real en descarga de tobera en función de velocidad medida en garganta.

3. SONDAS DIRECCIONALES

El objetivo de esta parte del trabajo es desarrollar la técnica de construcción de sondas direccionales a efectos de poder producir toda una familia de sondas desde 2 agujeros hasta 7 agujeros. Las sondas presentadas en este trabajo comprenden diversos tamaños de cabeza, diferentes tipos de cabeza (aguja, cónico y semiesférico), diferentes materiales y diferentes tipos de soporte. El objetivo fue experimentar con todas estas alternativas y seleccionar la mejor o las mejores para posteriormente fabricar toda una familia de sondas con una técnica standard, cubriendo los diferentes diámetros y largos disponibles en el mercado internacional.

El primer aspecto a considerar fue la disponibilidad de materia prima en el mercado nacional. En particular el elemento crítico son los tubos de acero inoxidable que constituyen los conductos internos de las sondas. El objetivo es utilizar estos tubos en diámetros y espesores muy chicos a efectos de reducir el tamaño global de la sonda y minimizar así el efecto intrusivo de la misma. Las sondas de 5 y 7 agujeros disponibles comercialmente tienen un diámetro de cabeza mínimo de 1.6mm y máximo de 6.35mm. Es por ello que los tubos internos deben ser de 0.5mm de diámetro externo para poder fabricar la sonda más chica. Tomando esta medida mínima como referencia, se encontró que la única alternativa es utilizar agujas hipodérmicas de uso medicinal pero estos tubos son relativamente cortos (longitud máxima de 5 a 7cm). Es necesario entonces concatenar estos tubos dentro de la sonda lo cual complejiza su diseño, no obstante, se arribó a una buena técnica de ensamblaje que se detalla a continuación.

3.1. Sonda de 2 agujeros

Se comenzó con la construcción de una sonda de 2 agujeros, debido a su simplicidad. La cabeza de la misma se compone de 2 agujas hipodérmicas standard de acero inoxidable de 1 mm de diámetro externo, 0.5 mm de diámetro interno y largo 56 mm. A estas agujas se les remueve el extremo de plástico y se las curva en "S" (Ver figura 17).

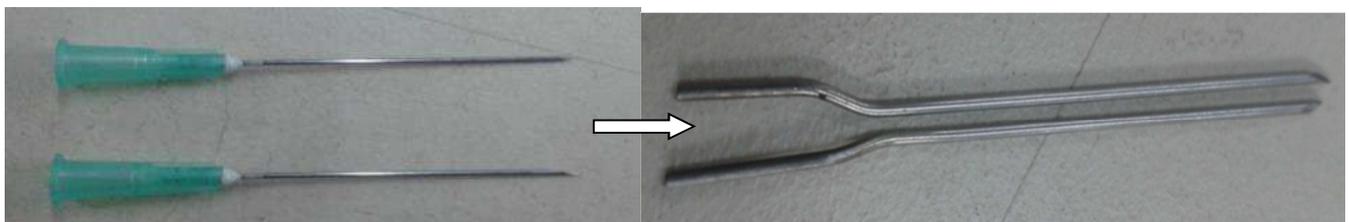


Figura 17: cabeza de la sonda

Los extremos curvados de las agujas se insertan dentro de tubos de cobre standard de 2mm de diámetro externo y 1mm de diámetro interno. La unión entre los tubos se sella con cianocrilato. Los tubos de cobre se propagan hasta el extremo trasero de la sonda, y son a la vez los conectores de salida de la sonda. Para darle rigidez al conjunto, se introdujeron los tubos de cobre dentro de una funda de aluminio, que es un tubo de 6.5mm de diámetro externo y 125mm de largo. La funda fue levemente ovalizada para que ingresen los tubos de cobre (Ver figura 18).



Figura 18: tubos de cobre y funda principal

La funda de aluminio no se extiende hasta la punta de la sonda ya que su gran tamaño relativo generaría una fuerte perturbación al flujo de aire durante la medición. Por este motivo, la parte delantera de la sonda está cubierta por otra funda más delgada: tubo de acero inoxidable de 2mm de diámetro externo, 33mm de largo (Ver figura 19). Para rigidizar la unión de las 2 fundas se utilizó cianocrilato y epoxi. Asimismo, la funda secundaria no se propagó hasta la punta de la sonda, sino que se prefirió dejar las agujas expuestas para minimizar el tamaño de la cabeza.



Figura 19: detalle de la funda secundaria

A efectos de poder montar firmemente la sonda en un sistema de posicionamiento, se le agregó un bloque de aluminio en la parte trasera, desde donde se soporta la sonda. Para esta sonda se utilizó un bloque doble, unido por remaches (Ver figura 20).



Figura 20: vista de detalle del soporte de la sonda

Una vez finalizada la sonda se le dio un biselado de $\pm 30^\circ$ a la cabeza y una limpieza interna con alcohol para evitar que queden residuos que puedan obstruir los conductos. La sonda finalmente se sometió a un ensayo hidráulico a efectos de verificar que no haya fugas de presión en los empalmes entre los tubos internos (cross-talking). El modelo finalizado puede observarse en la figura 21. Se trata de una sonda de 2 agujeros de tamaño de cabeza de 2mm y largo total de 190mm.



Figura 21: vista lateral de la sonda de 2 agujeros

3.2. Sonda de 3 agujeros

Para la sonda de 3 agujeros se utilizó la misma técnica constructiva, pero reemplazando la funda secundaria de acero inoxidable por una de bronce. Asimismo, para lograr una mejor vinculación entre las fundas delantera y trasera, se utilizó un cono de estaño en lugar de pegarlos con cianocrilato-epoxi. El modelo finalizado puede observarse en la figura 22. Se trata de una sonda de 3 agujeros de tamaño de cabeza de 2mm y largo total de 185mm.



Figura 22: vista de la cabeza de la sonda de 3 agujeros (izquierda) y vista general (derecha)

3.3. Sonda de 5 agujeros

Esta sonda es la más difícil de construir ya que los 4 tubos periféricos deben quedar a 90° entre sí, dispuestos alrededor de la sonda central. Para lograr este espaciamento idéntico se utilizan separadores dentro de la funda principal que mantienen los tubos en su lugar. La técnica constructiva es idéntica a la anterior, con la salvedad de que se utilizó una funda primaria de cobre y un bloque hexagonal en el soporte. En esta sonda se decidió extender la funda secundaria hasta la cabeza de la sonda de modo que los tubos de la cabeza queden completamente cubiertos. Luego se rellenaron los intersticios con epoxi y se mecanizó la cabeza hasta lograr una cabeza semiesférica. El modelo finalizado puede observarse en la figura 23. Se trata de una sonda de 5 agujeros de tamaño de cabeza de 5mm y largo total de 300mm.



Figura 23: vista de la cabeza de la sonda de 5 agujeros (izquierda) y vista general (derecha)

3.4. Sonda de 7 agujeros

Esta sonda es más simple de construir que la sonda de 5 agujeros ya que los 6 tubos periféricos rodean exactamente al tubo central. No es necesario entonces incorporar separadores. Como contraparte, es mayor la cantidad de tubos lo cual demanda más cuidado (y más tiempo) al momento de unir los tubos de inoxidable dentro de los tubos de cobre de salida. Asimismo, en esta sonda se decidió utilizar una cabeza cónica y una funda principal de carbono de 10mm de diámetro externo. El modelo finalizado puede observarse en la figura 24. Se trata de una sonda de 7 agujeros de tamaño de cabeza de 5mm y largo total de 300mm.



Figura 24: vista de la cabeza de la sonda de 7 agujeros (izquierda) y vista general (derecha)

3.5. Familia de sondas

En la figura 25 se puede ver la familia completa de sondas construidas para este estudio. Notar la diversidad de materiales y arquitecturas de sonda utilizadas.



Figura 25: familia de sondas direccionales

4. BANCO DE CALIBRACION DE SONIDAS

Las sondas direccionales de cabeza cónica o semiesférica admiten un modelado matemático, no obstante, dada las imperfecciones de construcción, siempre requieren de calibración. Asimismo, las cabezas tipo aguja, no admiten modelo matemático por lo cual la calibración es un paso inevitable. La calibración es entonces una herramienta para cuantificar la calidad de las sondas y para para generar los datos que permiten utilizarlas en las mediciones de rutina.

Dado que las sondas están pensadas para poder medir las 3 componentes del vector velocidad de viento, así como las presiones total y estática en la cabeza, es necesario disponer de un utillaje que permita realizar una calibración contemplando esos parámetros [11]. Asimismo, dado que se desea calibrar toda una familia de sondas a una gama completa de velocidades, y dado que cada calibración consume mucho tiempo de ensayo, es deseable contar con un sistema automatizado que permita seguir en tiempo real la evolución de las calibraciones. Teniendo en cuenta estas consideraciones, LAYF desarrolló un sistema de calibración de sondas que se detalla a continuación.

4.1. Sistema de posicionamiento de la sonda

La sonda debe medir componentes de velocidad, por ello es necesario calibrarla en todo el rango previsto de ángulos de ataque y deslizamiento. Para el caso de las sondas de 5 agujeros el ángulo máximo práctico está en el rango de $\pm 40^\circ$ (En α y β) mientras que con las sondas de 7 agujeros se puede medir normalmente hasta $\pm 70^\circ$, e incluso $\pm 80^\circ$. El sistema de posicionamiento debe ser capaz entonces de poder orientar a la sonda en cualquier combinación de ángulos α y β dentro de esta envolvente. En nuestro caso adoptamos un diseño que permite alcanzar ángulos de $\pm 50^\circ$ ya que la tobera generaba limitaciones al movimiento del mecanismo. Esto no representa una limitación para calibrar las sondas de 7 agujeros ya que las mismas pueden montarse en un soporte en "Z" que decala la sonda 30° respecto del eje y así es posible alcanzar los $\pm 80^\circ$. El mecanismo elegido puede verse en la figura 26 y consta de 2 grados de libertad angulares (ángulo de cabeceo y ángulo de guiñada) que mantienen la cabeza de la sonda fija en el espacio independientemente de la posición angular. Este sistema fue rigidizado para evitar vibraciones y desplazamientos de la cabeza de la sonda durante la calibración.

El utillaje se mecanizó completamente en aluminio salvo las excepciones de unas pocas piezas realizadas en acero y plástico (impresión 3D). Para su movimiento alrededor del eje de guiñada se eligió un motor paso a paso de 4 Kg.cm con un tren de reducción epicicloidal 96:1. Para su movimiento en el eje de cabeceo se eligió un motor paso a paso de 7 Kg.cm acoplado a un mecanismo de reducción sin fin-corona con relación de 57:1. La resolución angular del sistema es de $0.01^\circ/\text{paso}$ por lo cual las calibraciones se realizan con alta precisión de posicionamiento.

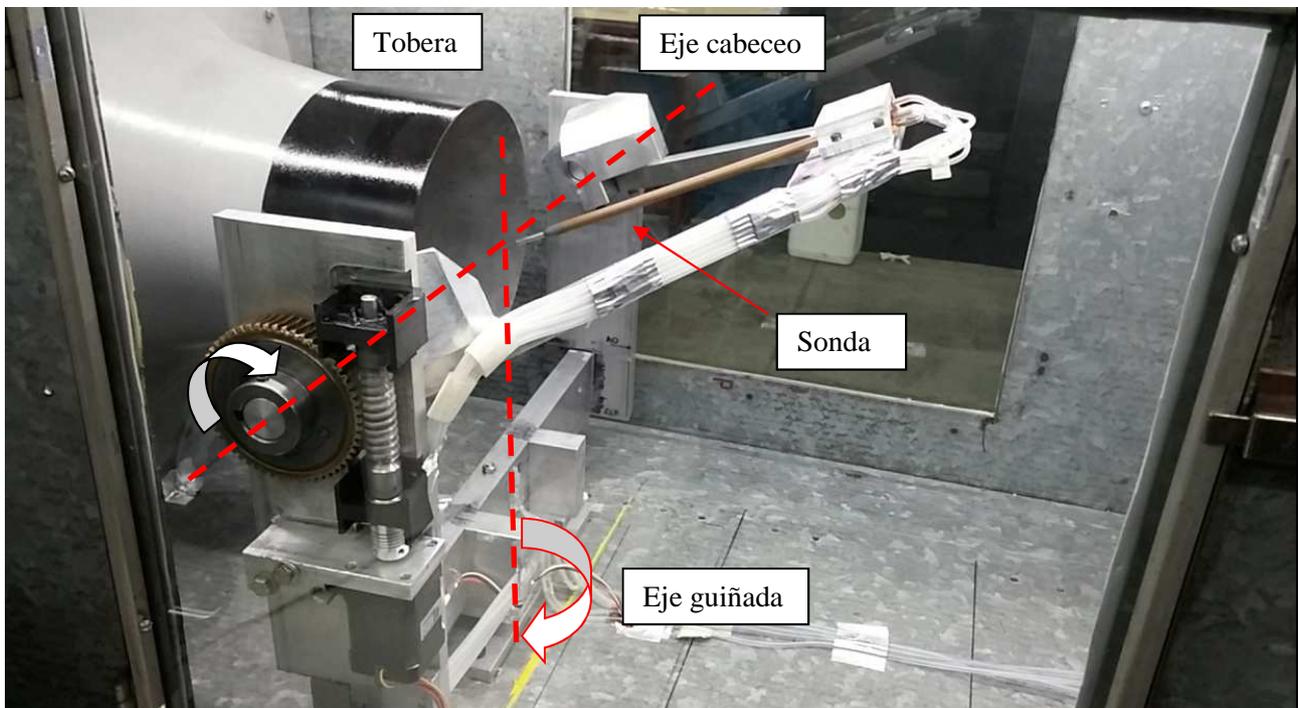


Figura 26: Utillaje de calibración de dos grados de libertad

4.2. Sistema de control

El control de los motores paso a paso (MPAP) se realiza con un sistema desarrollado íntegramente en el LAYF. Consta de 2 puentes H que controlan directamente los motores del mecanismo. Estos puentes están conectados a un

LPCXpresso el cual, mediante una aplicación, permiten elegir la velocidad de rotación de los motores y el mallado de puntos (α , β) que debe recorrer el mecanismo durante la calibración.

4.3. Sistema de adquisición de presiones

El sistema de adquisición de presiones (SAP) consta de un rack de 32 transductores de presión de 400mmCA de rango y su respectivo programa de medición y presentación de datos en tiempo real. Este programa tiene incluido un módulo de calibración de sondas direccionales que utilizan las ecuaciones de calibración explicadas más adelante en este informe. Durante la calibración, el SAP va generando un archivo CSV con las mediciones realizadas hasta el momento, archivo que es utilizado para monitorear la calibración. Asimismo, el mapa de calibración esta también disponible en formato Excel y es el archivo que se lee durante la utilización práctica de la sonda.

4.4. Sistema de visualización de datos

Para visualizar los mapas de calibración se utilizó el programa Paraview 3.98.1, al cual se le realizaron unas modificaciones para poder mostrar los gráficos en tiempo real. Este programa permite aplicar una serie de filtros a los archivos CSV con las mediciones a efectos de graficar los mapas de calibración.

4.5. Operación del sistema en tiempo real

Durante la calibración de la sonda, los 3 programas mencionados anteriormente interactúan entre sí, permitiendo seguir las calibraciones en tiempo real. En primera instancia el MPAP recibe las instrucciones sobre los puntos a recorrer durante la medición. Al iniciar el proceso el MPAP y el SAP se comunican constantemente entre ellos a efectos de coordinar las mediciones y los desplazamientos del mecanismo. Paraview es el elemento pasivo del sistema y solo se limita a leer continuamente el archivo CSV de salida del SAP para mostrar los mapas de calibración. Esto se observa en la figura 27

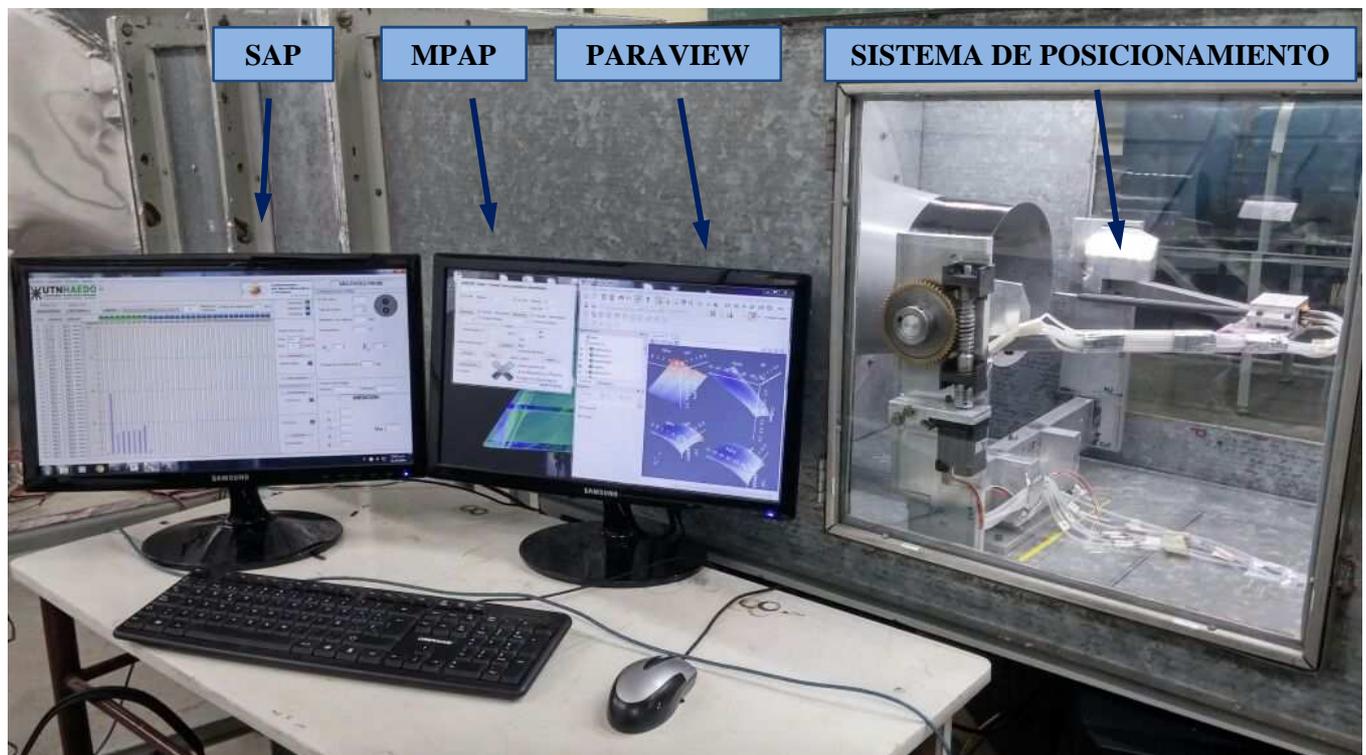


Figura 27: Operación del sistema y visualización en tiempo real de los resultados.

5. SISTEMA DE REFERENCIA PARA LAS CALIBRACIONES

El túnel de viento de calibración utiliza el sistema de referencia que se observa en la figura 28. El utilaje posiciona a la sonda en una serie de ángulos “ θ ” respecto al eje del túnel de viento (“ θ ” es el ángulo de actitud de la sonda). Este ángulo no es necesariamente el ángulo que se va a formar entre la dirección del viento y el eje de la sonda. Esto se debe a que generalmente el túnel de viento de calibración va a tener una cierta componente vertical de aire (upwash), lo que hace que el vector velocidad esté inclinado un ángulo “ α_u ” respecto al eje del túnel.

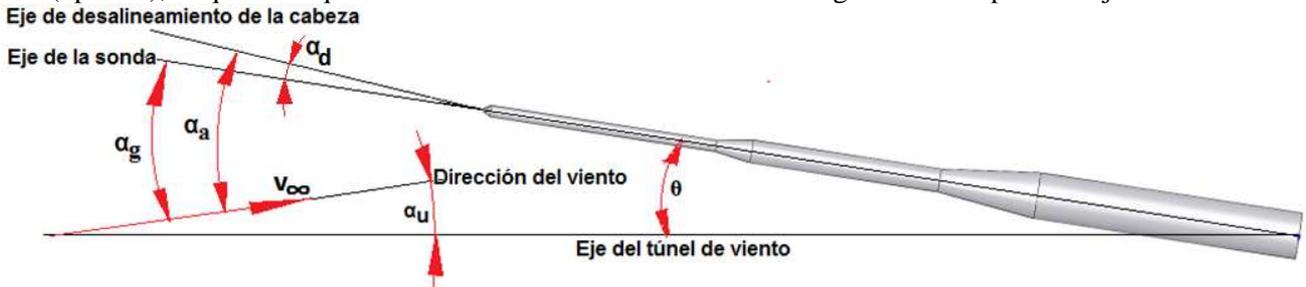


Figura 28: sistema de referencia del túnel de calibración (plano vertical)

El ángulo formado entre el eje de la sonda y la dirección de viento es el ángulo de ataque geométrico de la sonda “ α_g ”. Notar que “ α_g ” es el mismo ángulo “ α ” definido en la ecuación (2) y por ello usaremos indistintamente “ α_g ” o “ α ” a lo largo de este trabajo.

Por otro lado, dado que es imposible fabricar una sonda perfectamente simétrica, la diferencia de presiones entre los tubos externos de la sonda no necesariamente se va a anular cuando el viento relativo incida según la dirección del eje de la sonda. En este caso se va a anular cuando el viento tenga una cierta inclinación “ α_d ” respecto a este eje. Esta dirección de anulación de la diferencia de presiones entre los tubos externos se denomina “eje de desalineamiento” o “dirección de anulación” de la sonda (es un concepto muy similar al ZLL de un perfil alar), mientras que “ α_d ” se denomina “ángulo de desalineamiento” de la sonda.

Este concepto permite definir el ángulo de ataque aerodinámico de la sonda “ α_a ” como en la ecuación (3):

$$\alpha_a = \alpha_g + \alpha_d \quad (3)$$

Que además es igual a:

$$\alpha_a = (\theta + \alpha_u) + \alpha_d \quad (4)$$

Lo explicado anteriormente corresponde al plano vertical del túnel de calibración. Sin embargo, esto también ocurre en el plano horizontal. En ese caso los ángulos de ataque “ α ” son reemplazados por los ángulos de deslizamiento “ β ”, mientras que el ángulo de actitud “ θ ” es reemplazado por el ángulo de guiñada “ ψ ”.

Los parámetros α_d , α_u , β_d y β_u , se obtienen aplicando la “técnica de inversión” [1]. En lo sucesivo de este informe hablaremos indistintamente de “ θ ” y “ α ” pues están correlacionados.

6. CALIBRACION DE SONDA DE 2 AGUJEROS

La sonda de 2 agujeros no permite medir la velocidad de corriente libre, sino que solo mide la angularidad del flujo respecto al eje de la sonda [12]. Por este motivo no se la suele utilizar en ensayos en túnel de viento. Aquí será utilizada exclusivamente en la campaña de caracterización del túnel de calibración, a fin de determinar la angularidad propia del túnel (“ α_u ” y “ β_u ”).

6.1. Nomenclatura

La numeración de los tubos de esta sonda se indica en la figura 29:

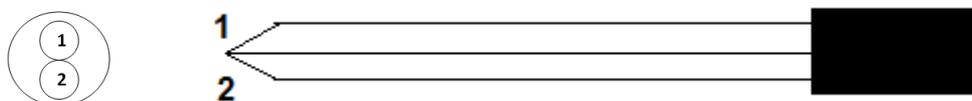


Figura 29: numeración de agujeros

6.2. Parámetros medidos durante la calibración

Para calibrar esta sonda, se la monta en un dispositivo que permite posicionarla en una serie de ángulos “ θ ”. Para cada una de las posiciones se mide la presión en los 2 agujeros de la sonda. Asimismo, durante la calibración se utiliza una sonda Pitot auxiliar que permite medir la presión total y también una toma de presión estática. En síntesis, los parámetros a medir son:

- P_t = Presión total de la sonda Pitot
- P_s = Presión estática de toma la toma en garganta de tobera
- P_1 = Presión en el tubo superior
- P_2 = Presión en el tubo inferior
- θ = ángulo de la sonda respecto al eje del túnel de viento

6.3. Ecuaciones de calibración

A partir de los datos medidos durante la calibración se deben realizar una serie de cálculos que permiten obtener los coeficientes característicos de la sonda.

La presión dinámica “ q ” viene dada por la ecuación (5):

$$q = P_t - P_s \quad (5)$$

El coeficiente de presión angular de la sonda se define como:

$$Cp_\alpha = \frac{P_2 - P_1}{q} \quad (6)$$

Dado que durante la calibración se hace variar el ángulo de actitud de la sonda, el Cp_α será una función de “ θ ”:

$$Cp_\alpha = f(\theta) \quad (7)$$

Esa función define la curva de calibración de la sonda de 2 agujeros.

6.4. Curvas de calibración

En la figura 30 se muestra un ejemplo de datos medidos durante la calibración de un prototipo de sonda de 2 agujeros. La curva sigue un comportamiento lineal en el rango de $\alpha=(-40^\circ,+30^\circ)$, que es el rango práctico de medición con esta sonda. A partir de ese punto una de las sondas presenta separación de capa límite generando una no linealidad. Notar además que esta curvas no pasa por el origen de coordenadas, sino que lo hacen en $\theta=-2.5^\circ$ precisamente por la existencia del eje de desalineamiento de la sonda.

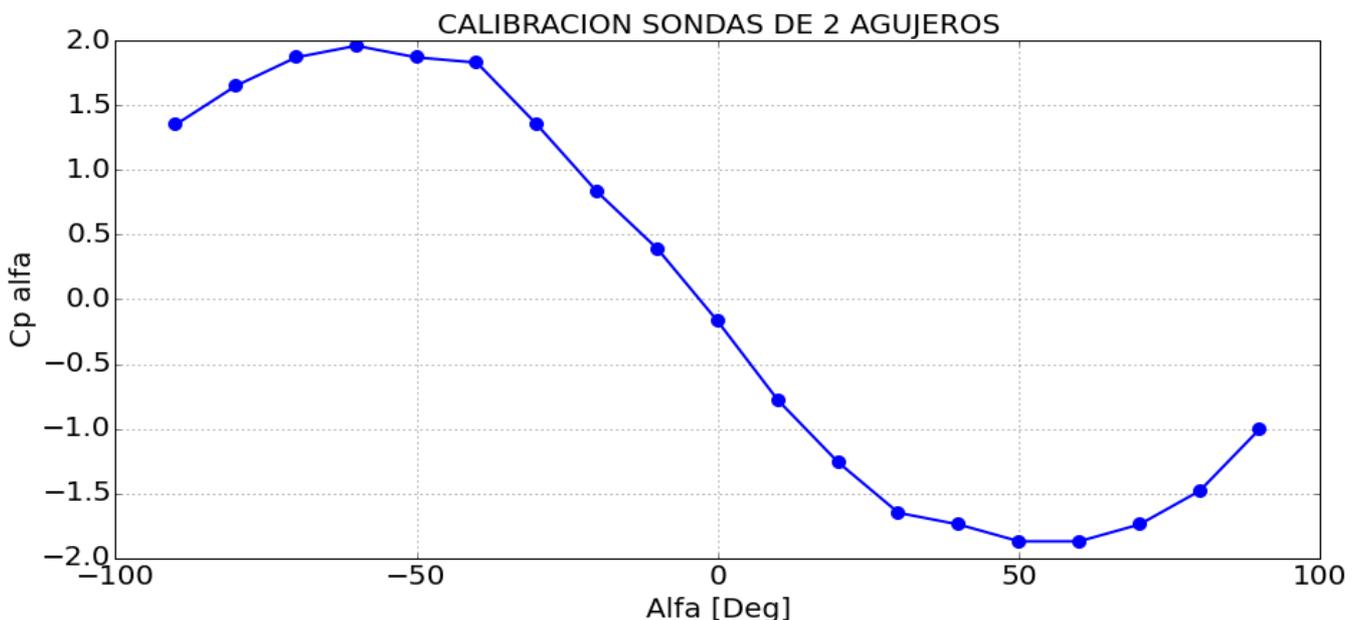


Figura 30: curvas de calibración de sonda de 2 agujeros

7. CALIBRACION DE SONDA DE 3 AGUJEROS

Esta sonda permite medir ángulos de flujo, así como la presión estática, presión total y velocidad en la cabeza de la sonda [13].

7.1. Nomenclatura

La numeración de los tubos de esta sonda se indica en la Figura 31:

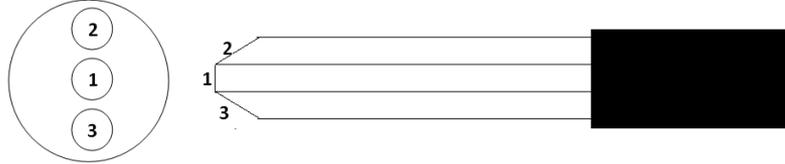


Figura 31: numeración de agujeros

7.2. Parámetros medidos durante la calibración

El set-up de calibración de las sondas de 3 agujeros es idéntico al anterior salvo que se miden las presiones en los 3 tubos de la sonda.

7.3. Ecuaciones de calibración

A partir de los datos medidos durante la calibración se deben realizar una serie de cálculos que permiten obtener los coeficientes característicos de la sonda.

Se define la presión estática media de la sonda como:

$$\overline{P_{S_s}} = \frac{P_2 + P_3}{2} \quad (8)$$

Se define el coeficiente de presión angular de la sonda como:

$$Cp_\alpha = \frac{P_3 - P_2}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (9)$$

Se define el coeficiente de presión estática de la sonda como:

$$Cp_s = \frac{\overline{P_{S_s}} - P_s}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (10)$$

Se define el coeficiente de presión total de la sonda como:

$$Cp_t = \frac{P_1 - P_t}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (11)$$

Durante la calibración solo se hace variar el ángulo de actitud “ θ ” de la sonda, luego:

$$\begin{aligned} Cp_\alpha &= f(\alpha) \\ Cp_s &= f(\alpha) \\ Cp_t &= f(\alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

Dónde:

$$\alpha = \theta + \alpha_U \quad (13)$$

7.4. Curvas de calibración

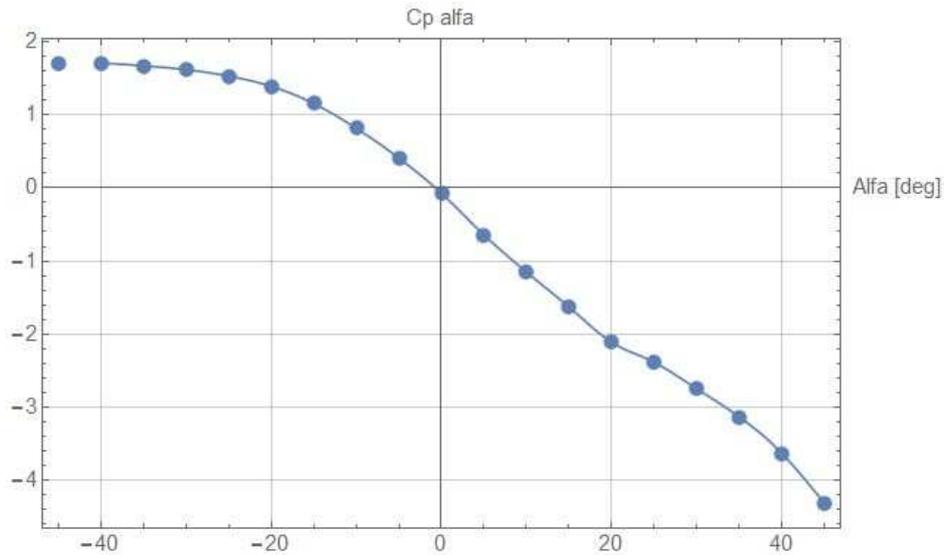


Figura 32: Curva de calibración de sonda de 3 agujeros

8. CALIBRACION DE SONDA DE 5 AGUJEROS

Esta sonda permite medir ángulos de flujo, así como la presión estática, presión total y velocidad en la cabeza de la sonda [14, 15].

8.1. Nomenclatura

La numeración de los tubos de esta sonda se indica en la Figura 33:

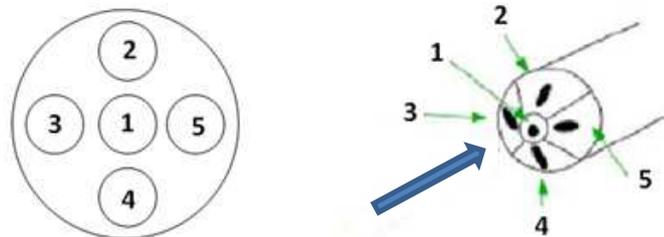


Figura 33: numeración de agujeros

8.2. Parámetros medidos durante la calibración

El set-up de calibración de las sondas de 5 agujeros es idéntico al anterior. Los parámetros a medir son:

- P_t = Presión total de la sonda Pitot
- P_s = Presión estática de la garganta de la tobera
- P_1 = Presión en el tubo central
- P_2 = Presión en el tubo superior
- P_3 = Presión en el tubo lateral derecho de la sonda
- P_4 = Presión en el tubo inferior
- P_5 = Presión en el tubo lateral izquierdo de la sonda
- θ = ángulo de actitud de la sonda respecto al eje del túnel de viento
- ψ = ángulo de guiñada de la sonda respecto al eje del túnel de viento

8.3. Ecuaciones de calibración

A partir de los datos medidos durante la calibración se deben realizar una serie de cálculos que permiten obtener los coeficientes característicos de la sonda.

Se define la presión estática media de la sonda como:

$$\overline{P_{S_s}} = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{4} \quad (14)$$

Se definen los coeficientes de presión angular de la sonda como:

$$Cp_\alpha = \frac{P_4 - P_2}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (15)$$

$$Cp_\beta = \frac{P_5 - P_3}{P_1 - \overline{P_{S_s}}}$$

Se define el coeficiente de presión estática de la sonda como:

$$Cp_s = \frac{\overline{P_{S_s}} - P_s}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (16)$$

Se define el coeficiente de presión total de la sonda como:

$$Cp_t = \frac{P_1 - P_t}{P_1 - \overline{P_{S_s}}} \quad (17)$$

Durante la calibración solo se hace variar el ángulo de actitud y guiñada de la sonda, luego:

$$Cp_\alpha = f(\alpha, \beta) \quad (18)$$

$$Cp_\beta = f(\alpha, \beta)$$

$$Cp_s = f(\alpha, \beta)$$

$$Cp_t = f(\alpha, \beta)$$

Dónde:

$$\alpha = \theta + \alpha_U \quad (19)$$

$$\beta = \psi + \beta_U$$

8.4. Curvas de calibración

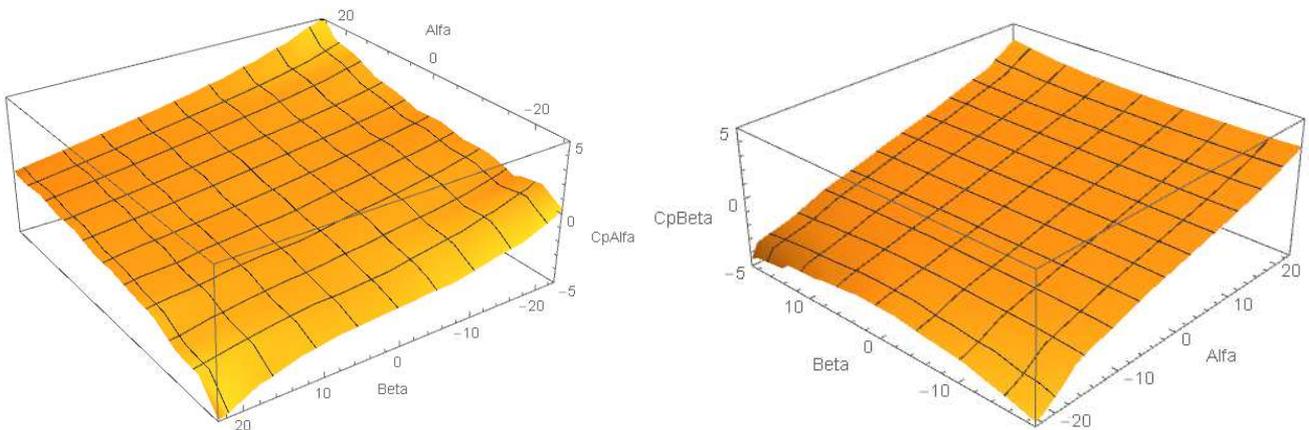


Figura 34: Mapa de calibración de sonda 5 agujeros. CpAlfa, izquierda. CpBeta derecha.

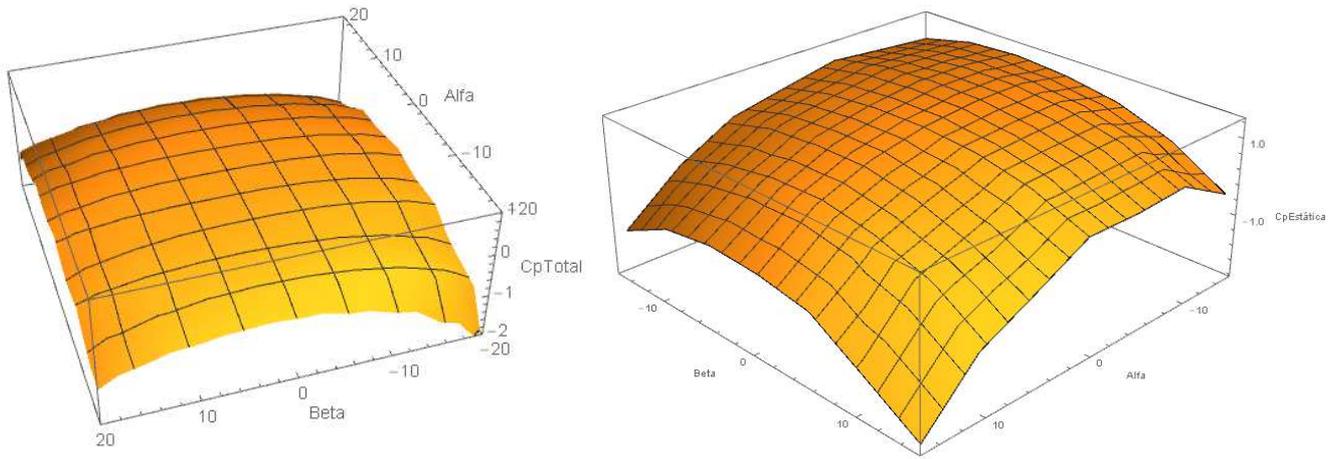


Figura 35: Mapa de calibración de sonda 5 agujeros. CpTotal, izquierda. CpEstática derecha.

9. CALIBRACION DE SONDA DE 7 AGUJEROS

9.1. Nomenclatura

La sonda de 7 agujeros está pensada para ser ensaya a grandes ángulos de ataque [16, 17, 18]. En esa condición las tomas de presión aguas abajo quedan inmersas en la zona de separación y por eso quedan anuladas para su procesamiento. Por ello, en esta sonda se va a utilizar un enfoque de calibración diferente a las sondas anteriores. Antes usábamos un mismo set de ecuaciones para todo el rango de ángulos de ataque y deslizamiento. Ahora vamos a utilizar un set de ecuaciones para cada uno de las 7 regiones de la sonda. Estas regiones se observan en la figura 36 y corresponden a las combinaciones de Alfa y Beta en donde la presión en un agujero es la máxima de todas.

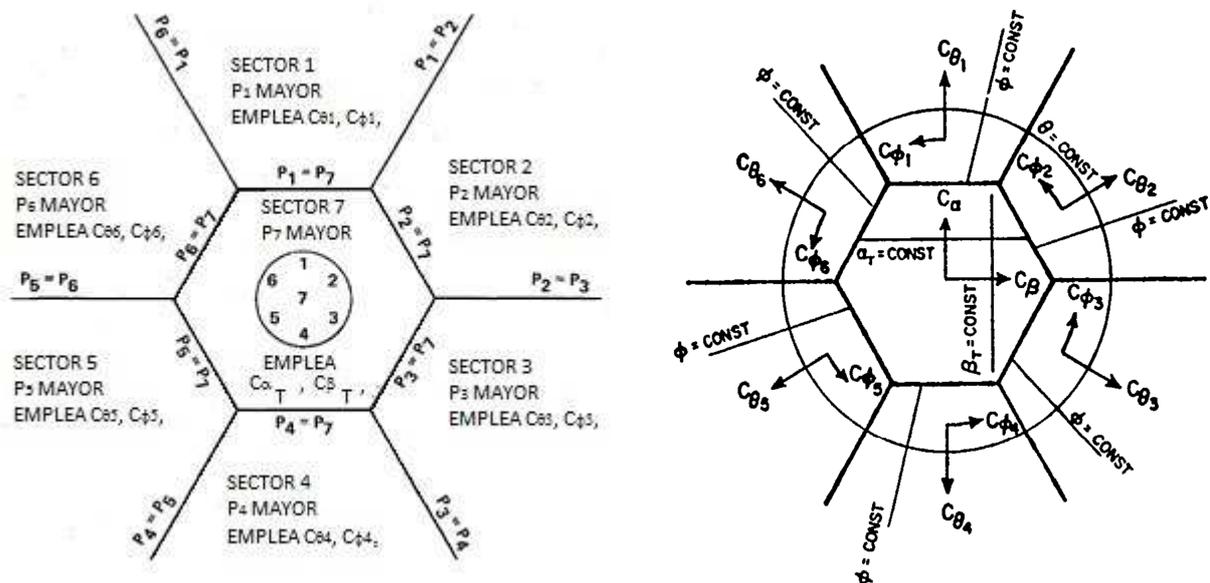


Figura 36: numeración de agujeros y definición de zonas

En el sector 7 (es decir, P7 es la máxima de todas), se usa un sistema de ecuaciones similar al utilizado en la sonda de 5 agujeros, pero contemplando las presiones de los 7 agujeros. En el resto de los sectores se usan unas ecuaciones sectorizadas contemplando solamente las 4 tomas aledañas a la sonda de presión máxima. En este caso (zonas periféricas) se usan unas ecuaciones en un sistema de referencia polar que le observa en la imagen anterior,

donde Tita varia alejándose del eje de la sonda (dirección radial) y φ en la dirección circunferencial (dirección tangencial).

9.2. Parámetros medidos durante la calibración

Es idéntico al de sonda de 5 agujeros, salvo que ahora se miden las presiones en los 7 agujeros de la sonda.

9.3. Ecuaciones de calibración

Las ecuaciones a utilizar dependen de la región de la sonda. Si la presión en 7 es la máxima (condición de bajos ángulos alfa y beta), se utilizan estas ecuaciones:

- Presión estática promedio:

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6}{6} \quad (20)$$

- Coeficientes de presiones “a”, “b” y “c”:

$$\begin{aligned} Cp_a &= \frac{P_4 - P_1}{P_7 - \bar{P}} \\ Cp_b &= \frac{P_3 - P_6}{P_7 - \bar{P}} \\ Cp_c &= \frac{P_2 - P_5}{P_7 - \bar{P}} \end{aligned} \quad (21)$$

- Coeficientes angulares de la sonda de la zona 7 (combinación de las anteriores):

$$\begin{aligned} Cp_{\alpha\gamma} &= Cp_a + \frac{Cp_b - Cp_c}{2} \\ Cp_{\beta\gamma} &= \frac{Cp_b + Cp_c}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (22)$$

- Coeficientes de presión total y estática de la zona 7:

$$\begin{aligned} Cp_s &= \frac{\bar{P} - P_7}{P_7 - \bar{P}} \\ Cp_t &= \frac{P_7 - P_t}{P_7 - \bar{P}} \end{aligned} \quad (23)$$

Si la presión P_i es máxima ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$), se definen ecuaciones en un sistema de referencia polar local mostrado anteriormente. En cada sector “i” se definen los coeficientes angulares radiales y tangenciales.

- Coeficientes radiales y tangenciales locales:

$$\begin{aligned} Cp_{r1} &= \frac{P_1 - P_7}{P_1 - 0.5(P_2 + P_6)} & Cp_{t1} &= \frac{P_6 - P_2}{P_1 - 0.5(P_2 + P_6)} \\ Cp_{r2} &= \frac{P_2 - P_7}{P_2 - 0.5(P_1 + P_3)} & Cp_{t2} &= \frac{P_1 - P_3}{P_2 - 0.5(P_1 + P_3)} \\ Cp_{r3} &= \frac{P_3 - P_7}{P_3 - 0.5(P_2 + P_4)} & Cp_{t3} &= \frac{P_2 - P_4}{P_3 - 0.5(P_2 + P_4)} \\ Cp_{r4} &= \frac{P_4 - P_7}{P_4 - 0.5(P_3 + P_5)} & Cp_{t4} &= \frac{P_3 - P_5}{P_4 - 0.5(P_3 + P_5)} \\ Cp_{r5} &= \frac{P_5 - P_7}{P_5 - 0.5(P_4 + P_6)} & Cp_{t5} &= \frac{P_4 - P_6}{P_5 - 0.5(P_4 + P_6)} \\ Cp_{r6} &= \frac{P_6 - P_7}{P_6 - 0.5(P_5 + P_1)} & Cp_{t6} &= \frac{P_5 - P_1}{P_6 - 0.5(P_5 + P_1)} \end{aligned} \quad (24)$$

- Coeficientes de presión total y estática locales:

$$\begin{aligned}
 Cp_{t1} &= \frac{P_1 - P_t}{P_1 - 0.5(P_2 + P_6)} & Cp_{s1} &= \frac{0.5(P_2 + P_6) - P_s}{P_1 - 0.5(P_2 + P_6)} \\
 Cp_{t2} &= \frac{P_2 - P_t}{P_2 - 0.5(P_1 + P_3)} & Cp_{s2} &= \frac{0.5(P_1 + P_3) - P_s}{P_2 - 0.5(P_1 + P_3)} \\
 Cp_{t3} &= \frac{P_3 - P_t}{P_3 - 0.5(P_2 + P_4)} & Cp_{s3} &= \frac{0.5(P_2 + P_4) - P_s}{P_3 - 0.5(P_2 + P_4)} \\
 Cp_{t4} &= \frac{P_4 - P_t}{P_4 - 0.5(P_3 + P_5)} & Cp_{s4} &= \frac{0.5(P_3 + P_5) - P_s}{P_4 - 0.5(P_3 + P_5)} \\
 Cp_{t5} &= \frac{P_5 - P_t}{P_5 - 0.5(P_4 + P_6)} & Cp_{s5} &= \frac{0.5(P_4 + P_6) - P_s}{P_5 - 0.5(P_4 + P_6)} \\
 Cp_{t6} &= \frac{P_6 - P_t}{P_6 - 0.5(P_5 + P_1)} & Cp_{s6} &= \frac{0.5(P_5 + P_1) - P_s}{P_6 - 0.5(P_5 + P_1)}
 \end{aligned} \tag{24}$$

10. CONCLUSIONES

El demostrador conceptual realizado ha probado la factibilidad y facilidad de tener un sistema completo de construcción y calibración de sondas multiagujero a muy bajo costo. Esta capacidad de tener el sistema completo desde la construcción hasta la calibración brinda al laboratorio la posibilidad de disponer y mantener sondas multiagujero de manera independiente, un instrumento de medición que abre todo un nuevo abanico de posibilidades dado la gran información que estas sondas proporcionan para los estudios aerodinámicos en túnel de viento.

11. TRABAJOS FUTUROS

Una vez comprobada la factibilidad del sistema, se pasará a trabajar en la calibración propiamente dicha y experimentar con distintos tipos de cabeza de sonda, y ángulos de fresado de las mismas para encontrar la mejor configuración para cada aplicación. También se debe trabajar en el post procesamiento de datos, y su aplicación en mapeo de estelas de cuerpos.

12. AGRADECIMIENTOS

A todo el equipo de trabajo del LAYF y a los pasantes del EEST N°8 Jorge Newbery por el gran esfuerzo y esmero en las actividades realizadas para este trabajo. A Carlos Stortoni por el mecanizado de precisión. A Rubén Bufanio por el asesoramiento respecto a la puesta en funcionamiento del motor del túnel.

REFERENCIAS

- [1] Rae, Pope, "Low-Speed Wind Tunnel testing", second edition, John Wiley & Sons, USA, 1984.
- [2] Scheiman, "Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens To Reduce Wind-Tunnel Turbulence", NASA Technical Memorandum 81868, 1981.
- [3] Afchain, Broussaud, Frugier, Rancarani, "La Soufflerie F2 du Centre du Fauga Mauzac", ONERA, 20^{ème} colloque d'aérodynamique appliquée AAAF, Toulouse, France, 8-10 novembre, 1983.
- [4] Aguirre, Milanese, Ruscio, Olmedo, "Desarrollo Experimental de Equipo de Tomoscopia Laser", Revista Tecnología y Ciencia, Universidad Tecnológica Nacional, 2016.
- <http://sicyt.scyt.rec.utn.edu.ar/scyt/publicdeFR/publicaciones/FRHAE/Tomoscop%C3%ADa-L%C3%A1ser-rev1.pdf>
- [5] Pope, "Wind Tunnel Calibration Techniques", AGARDograph 54, 1961.
- [6] AGAR D-AR-304, "Quality Assessment for Wind Tunnel Testing", Advisory Group for aerospace Research & Development, 1994.

- [7] Gorlin, Slezinger, "*Wind Tunnel & Their Instrumentation*", First edition, Wiener Bindery Ltd., Jerusale, 1966.
- [8] Krause, "*Effects of Pressure Rake Design Parameters on Static-Pressure Measurements For Rakes Used in Subsonic Free Jets*", NACA TN 2520, 1951.
- [9] Gracey, Letko, Russell, "*Wind Tunnel Investigation of a Number of Total Pressure Tubes at High Angle of Attack*", NACA Technical Note 2331, 1951.
- [10] Aguirre, Toomey, Olmedo, Recce, "*Sistema 3D de Integración de Datos de Ensayos Aerodinámicos en Túnel de Viento*", Revista Tecnología y Ciencia, Universidad Tecnológica Nacional, 2016. [online]. Available: <http://sicyt.scyt.rec.utn.edu.ar/scyt/publicdeFR/publicaciones/FRHAE/Integracion%20de%20datos%20rev%201.pdf>
- [11] Gaillard, "*Developement of a Calibration Bench for Smal Anemoclinometer Probes*", Symposium of Aerodynamic Measuring techniques for Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines, Belgium, 1990.
- [12] Schulze, Ashby, Erwin, "*Several Combination Probes for Surveying Static and Total Pressure and Flow Direction*", NACA TN 2830, 1952.
- [13] Lerena Diaz, "*Experimental Calibration of Three-Hole Pressure Probes with Different Head Geometries*", Diploma Thesis, Institute of Thermal Turbomachines and Powerplants Vienna University of Technology, 2003.
- [14] Lee, Wood, "*Calibration and Data Reduction for a Five-Hole Probe*", Stanford University, 1986.
- [15] Yasa, Paniagua, "*Robust Post-Processing Procedure for Multi-Hole directional Probes*", Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011.
- [16] Gallington, "*Measurement of Very Large Flow Angles With Non-Nulling Seven-Hole Probes*", USAF A-TR-80-17, 1981.
- [17] Everett, Gerneiy, Durston, "*Seven-Hole Cone Probes for High Angle Flow Measurement: Theory and Calibration*", AIAA 20th Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Fla., Jan. 11-14, 1982.
- [18] Zilliac, "*Calibration of Seven-Hole Pressure Probes for Use in Fluid Flows with Large Angularity*", NASA Technical Memorandum 102200, 1989.