

## Tema A4: Termofluidos

### “Mejoramiento del comportamiento aerodinámico de una canastilla experimental”

G- Ramírez-Zúñiga<sup>a\*</sup>, M. Vargas<sup>b</sup>, G. Hernández-Cruz<sup>a</sup>, J. A. Castillo<sup>a</sup> y E. Ramos<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Energías Renovables, Privada Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México.

<sup>b</sup>Instituto Nacional de México, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Calzada Tecnológico No. 27, Zacatepec de Hidalgo, Morelos, C.P. 62780, México.

\*guraz@ier.unam.mx

---

#### RESUMEN

Presentamos el diseño la construcción y la caracterización de las canastillas de una centrifuga que opera a 20 g. Se mejoró el diseño aerodinámico de la canastilla. La nueva forma de las canastillas se fundamenta en el perfil NACA 64A210. Se determinó el coeficiente de arrastre del perfil aerodinámico de la canastilla. Se calculó por simulación FDC su magnitud es similar al de un contorno naval. Además se obtuvo experimentalmente el campo de velocidad alrededor de un modelo a escala 1:7 de la canastilla utilizando un sistema estereoscópico de Velocimetría de imágenes de partículas. Los experimentos fueron hechos en un túnel de agua en condiciones de  $Re = 2.2 \times 10^4$ . Adicionalmente, se presenta la simulación por elemento finito de la estructura interna de la canastilla que soporta 20 kg de carga máxima.

Palabras Clave: Aerodinámico, centrifuga, canastilla.

---

#### ABSTRACT

We presented the design, construction and characterization of the baskets of a centrifuge which operates at 20g. The aerodynamics design of the basket is improved. The newer form of the baskets is based on a NACA 64A210 profile. We determined the drag coefficient of the basket aerodynamic profile. It was evaluated by CFD simulation, its magnitude is comparable at a naval contour. Moreover, the velocity field around a 1:7 scale basket model it was obtained experimentally using a stereoscopic particle image velocimetry system. The experiments were done in a water tunnel to a Reynolds number  $Re = 2.20 \times 10^4$ . Additionally, we discussed in detail the baskets fabrication process, its manufacture and instrumentation. Furthermore, we presented a simulation of the internal structure which it withstand a 20 kg at maximum payload.

Keywords: Aerodynamic, centrifugal, basket.

---

#### 1. Introducción

Con el objetivo de conocer la influencia de la fuerza de la gravedad en distintos sistemas biológicos y físicos se han realizado experimentos en centrífugas que operan hasta 50 g (donde g es la aceleración de la gravedad: 9.807 m/s). Se ha explorado un amplio espectro de esta fuerza en centrífugas de diversos diseños, dimensiones y con distintas aplicaciones. Estos dispositivos son una valiosa herramienta en estudios de la ciencia de los materiales, dinámica de fluidos, geología, biología e ingeniería aeronáutica y espacial. [1, 2, 3 y 4]. En estudios geotécnicos se emplean grandes centrífugas donde se analiza desde la construcción de taludes para determinar la estabilidad de su pendiente o la simulación de terremotos entre otros. [5 y 6]. Además, el

adiestramiento físico y psicológico de pilotos y cosmonautas que están sometidos por períodos muy cortos a aceleraciones cercanas a 15g se efectúan en centrífugas de radio pequeño (2.82m a 4.7g) o de gran radio: 9.4 m a 9 g. En ellas se evaluando la densidad ósea, la regeneración de células, el sistema nervioso del individuo etc. Estas pruebas extremas simulan las condiciones en vuelos espaciales y supersónicos. Por otra parte, se emplean pequeñas centrífugas de eje vertical y radio muy pequeño en biología, medicina y en la industria. Estas operan a grandes velocidades y aceleraciones se utilizan para separar soluciones, sedimentos, partículas, etc.

Básicamente una centrifuga se compone de un motor y un rotor y suele alcanzar miles de revoluciones por minuto. Entre las variaciones de diseño se ha adicionando al motor una estructura metálica con brazos y canastillas,

denominadas también góndolas o cunas. En ellas se ubican los experimentos o los individuos de ensayo, además de estos cambios estructurales, su velocidad de giro es menor. Con este enfoque se construyó una centrífuga con el objetivo de estudiar los efectos de la fuerza centrífuga y de Coriolis en fenómenos de dinámica de fluidos y transferencia de calor en el laboratorio de Transferencia de Energía y Masa del IER-UNAM [7]. Opera a una velocidad máxima de 86 rpm y tiene un diámetro de 4 m. Cuenta con dos canastillas unidas cada una a los extremos de los brazos de la estructura principal. El acoplamiento a los brazos de la centrífuga es mediante un eje horizontal y dos chumaceras de 2.54 cm de diámetro con una separación de 0.22m entre ellas. Las chumaceras funcionan como una junta rotatoria que permite que las canastillas giren libremente alrededor del eje horizontal. Cuando la centrífuga se encuentra en movimiento la posición de las canastillas adquiere una cierta inclinación que depende de la acción simultánea de las fuerzas centrífuga y de la gravedad, el vector resultante de ambas fuerzas actúa en la canastilla. Resultando que el experimento montado en las canastillas alcanza 14 veces la aceleración de la gravedad, es decir se incrementa 14 veces su peso al operar el dispositivo.

Ambas canastillas tienen similares dimensiones 0.55 m x 0.28 m x 0.22 m y fueron construidas con ángulos de acero tipo DEXION. Tienen una masa aproximada de 6.5 kg y soportan 9.8 kg en ellas. La figura 1 muestra fotografías de las canastillas.

Actualmente se pretende realizar estudios más complejos que requieren equipos experimentales de mayor dimensión y complejidad. Por razones de mantenimiento preventivo y correctivo, se rediseñó la centrífuga en su totalidad, tanto su estructura y las canastillas. La longitud del brazo es y opera a 20 g.



Figura 1 - Fotografías de las canastillas de la centrífuga.

### 1.1. Problema de aerodinámica

Cualquier objeto que se desplaza en un fluido está sometido a una fuerza de arrastre y de sustentación. Debido a las perturbaciones inducidas por estas fuerzas y por las vibraciones mecánicas de los rodamientos y la flecha, la canastilla es un foco de oscilaciones que pueden transmitirse al experimento. Es conveniente diseñar la canastilla de la centrífuga con un perfil aerodinámico que reduzca las vibraciones a un nivel mínimo.

Cuando la centrífuga se encuentra en movimiento, se generan vibración en la estructura y en los equipos experimentales, a causa de las canastillas, las cuales tienen una sección transversal cuadrada, la cual está expuesta al flujo de aire. Para dar solución de manera rápida se incorporó posteriormente una geometría en sus extremos con forma de prisma triangular con la finalidad de disminuir el arrastre y la vibración. Esta solución provisional dio buenos resultados, quedando en evidencia la necesidad de mejorar el perfil de la canastilla.

Se tomaron las siguientes acciones para dar una solución definitiva al problema de vibraciones:

- Determinar parámetros de operación (condiciones de trabajo reales).
- Seleccionar un perfil adecuado para las dimensiones de la canastilla.
- Ajustar las propuestas a las necesidades de la canastilla y centrífuga.
- Evaluación de las de forma teórica y experimental las propuestas.
- Maquinar y ensamblar las nuevas canastillas.
- Pruebas preliminares del desempeño de la canastilla y su instrumentación en condiciones reales.

## 2. Parámetros de operación

La definición de los parámetros de operación de la canastilla contempló dos secciones de ella, A) la estructura interna, la cual da rigidez a la pieza y soporta el peso total del equipo experimental y B) la cubierta, superficie que estará en contacto con el flujo de aire cuando la canastilla se encuentre en rotación.

Las condiciones de trabajo de la estructura de la canastilla son:

- Peso del equipo experimental: máximo 20 kg.
- Peso de la estructura de la canastilla: máximo 10 kg.
- Aceleración resultante al interior de la canastilla: 20 g ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- Dimensiones de la sección intermedia o espacio para los equipos experimentales: longitud 60 cm mínimo y 140 cm máximo (l), ancho 40.2 cm (a) y altura 40.2 cm (h).
- Material de la estructura interna de la canastilla: Ligero, resistente a tensión mecánica y fácil de ensamblar.

Para el caso del perfil aerodinámico las condiciones de trabajo son:

- Velocidad de rotación ( $\omega$ ): 10.23 ciclos por segundo.
- Longitud del brazo de rotación (r): 1.87 m.
- Velocidad tangencial ( $V_T = \omega * r$ ): 19.16 m/s.
- Reynolds (Re): aproximadamente igual a  $1.7 \times 10^6$ .

$$Re = \rho v L / \mu \quad (1)$$

donde  $v$  es la velocidad de giro de la centrífuga (19.16 m/s),  $\mu$  es la viscosidad dinámica del aire ( $1.835 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ),  $\rho$  es la densidad del aire ( $1.184 \text{ kg/m}^3$ ) y  $L$  es la longitud característica del perfil (1.4 m) que se desea construir.

- Coeficiente de arrastre ( $C_D$ ): 0.04 – 0.08.

Las propiedades del aire se tomaron a una temperatura de 25 °C [8].

### 3. Selección y ajustes del perfil propuesto

Se tomó la decisión de emplear perfiles alares, en particular los perfiles de la serie NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) los cuales son perfiles de aeroplano [9]. Encontrando una variedad de perfiles similares a la forma naval, tales como la NACA0024, NACA0011, NACA0012, entre otros. La NACA tiene disponible archivos “.dat” con las coordenadas normalizadas de los diferentes tipos de perfiles aerodinámicos. Estos datos normalizados se adaptaron a las dimensiones reales de la canastilla y se graficó la propuesta del perfil. Se optó por utilizar el perfil designado como NACA-64A210, este perfil se puede apreciar en la Figura 2.

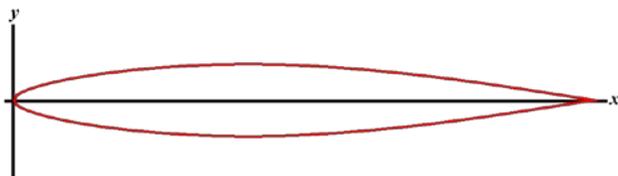


Figura 2 - Perfil NACA64A210.

Para el diseño de las partes frontal y trasera de la canastilla, se necesitaba un perfil simétrico respecto a su cuerda para evitar fuerza de sustentación. Como estrategia, se consideró sólo utilizar la parte superior del perfil NACA-64A210, de tal modo que se generó un nuevo perfil y un archivo con las coordenadas correspondientes. Este nuevo perfil se muestra en la Figura 3.

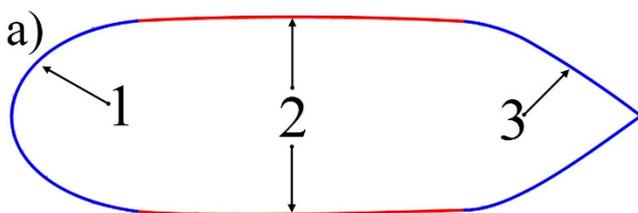


Figura 3 - Perfil modificado para la canastilla de la centrífuga, 1) nariz o frente, 2) sección intermedia o de experimentación y 3) cola o parte posterior de la canastilla.

El nuevo perfil presentó dos grandes problemas a resolver, el primero, dado que los perfiles obtenidos por NACA son en dos dimensiones, es necesario transformar el modelo 2D a un modelo 3D. El segundo problema es el acoplamiento de la nariz que tiene una geometría curva a la estructura de la canastilla con sección transversal cuadrada.

El problema del acoplamiento de geometrías se resolvió utilizando la ecuación 2, mediante la cual se puede transformar una geometría circular (punta de la nariz) a una geometría cuadrada (estructura interna).

$$\frac{x^n}{a^n} + \frac{y^n}{b^n} = 1 \quad (2)$$

El resultado del acoplamiento de las diferentes secciones transversales (ecuación 2) al perfil aerodinámico se puede observar en la Figura 4.

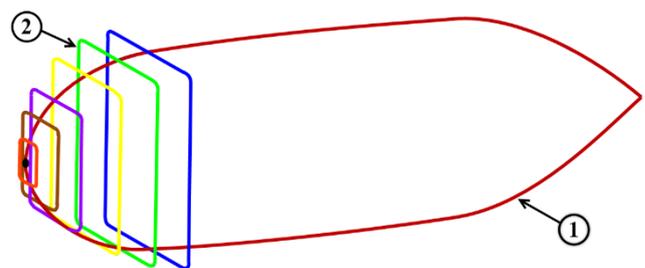


Figura 4 - Acoplamiento de las elipses de tamaño variante al perfil propuesto, para generar el modelo de la canastilla. 1) Perfil modificado y 2) elipses variantes generadas por la ecuación 2

### 4. Evaluación teórica y experimental del perfil aerodinámico

Se evaluó las características aerodinámicas del nuevo perfil: A) numéricamente, empleando software comercial. B) Experimentalmente, empleando un modelo a escala, para ser probado en un canal de agua. Ambas formas se describen a continuación.

#### 4.1. Simulación numérica

La simulación numérica se llevó a cabo en Comsol Multiphysics. Para esta simulación se consideró como fluido de trabajo al aire a una temperatura ambiente de 25°C, la geometría de la canastilla en 2 dimensiones, con un ángulo de ataque igual a 0°. La canastilla tiene una longitud característica de 1.4 m y la velocidad del aire se estableció en 19.16 m/s. El perfil de velocidades del flujo de ataque sobre el contorno de la canastilla fue tipo tapón y se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes en dos dimensiones [10]. Para el estudio se creó una geometría cuadrada para el dominio de cálculo (túnel de viento), de 20 veces la longitud característica de la geometría de la canastilla, siendo éste de gran tamaño para evitar efectos

debido a las fronteras. El resultado obtenido se muestra en la Figura 5 para el campo de velocidad y en la Figura 6 para el campo de presión.

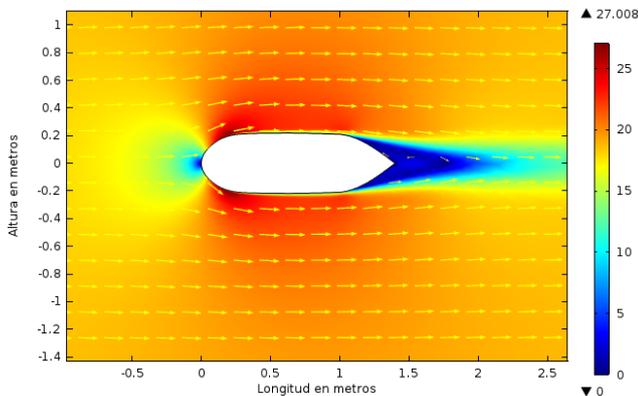


Figura 5 - Campo de velocidades calculado con Comsol.  $Re = 1.7 \times 10^6$ , para un régimen turbulento.

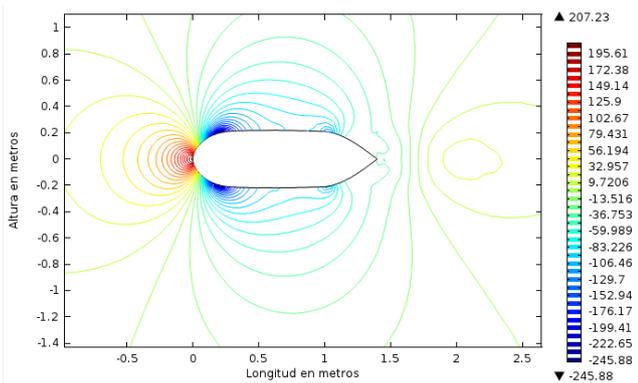


Figura 6 - Campo de presiones calculado con Comsol.

#### 4.2. Validación experimental

Se maquinó un modelo a escala (1:7) en una impresora 3D de la marca Prusa, modelo i3 (Figura 7 se muestra la impresora 3D realizando la impresión.). El material empleado fue un polímero PLA. Este trabajo se realizó colocando numerosas capas de material de 0.6 mm de espesor. El interior del modelo no es completamente sólido, tiene un arreglo en forma de panal de abeja para reducir el material empleado y el peso total del modelo. El modelo terminado se muestra en la Figura 8.

El modelo fue empleado para realizar pruebas aerodinámicas en un canal de agua de gran tamaño, con el propósito de conocer el perfil de velocidades alrededor de la canastilla y observar las estructuras hidrodinámicas del flujo alrededor del modelo.

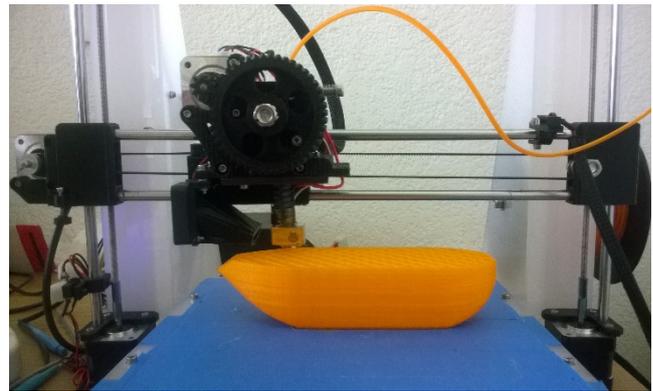


Figura 7 - Impresión del modelo a escala de la canastilla.



Figura 8 - Modelo terminado.

Se utilizó un sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas Estereoscópico (3 componentes de la velocidad,  $u$ ,  $v$  y  $w$ ). El equipo se compone de un láser doble de Nd-YAG, con una óptica integrada para una salida de plano de luz láser. Dos cámaras digitales de alta resolución (Nikon AF Nikkor, con una distancia focal de 50 mm y número F igual a 1:1.4). El sistema de control es de la marca LaVision, modelo VC-ImagerPro 2M, que sincroniza la emisión de pulsos de láser con las tomas de cámara, capturando un total de 90 campos de velocidad en un intervalo de 0.04 s. El procesamiento de imágenes se realiza mediante el software Davis 7.2.

El modelo se introdujo en el área de prueba del canal de agua (ver Figura 9), en esta sección se ilumina con un plano de luz láser de 1 mm de espesor. La sección frontal del modelo está orientada en dirección opuesta al flujo del canal.

Por otro lado, el número de Reynolds para el modelo que se calculó mediante la fórmula  $Re_{SC} = U_r L_r / \nu$  es igual  $2.20 \times 10^4$ , donde la velocidad promedio del fluido del canal,  $U_r = 0.106$  m/s; Longitud característica del modelo a escala,  $L_r = 0.0875$  m; la viscosidad cinemática  $\nu$  del agua a  $25^\circ$  C, es  $8.94 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

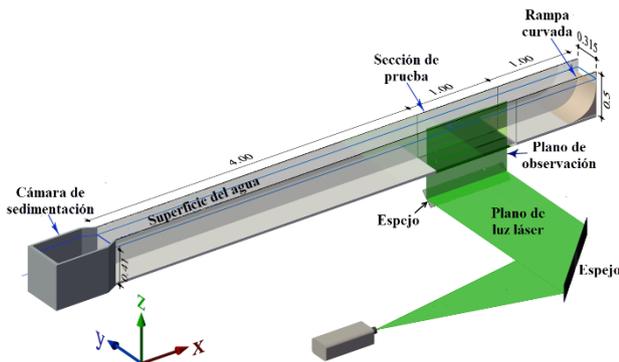


Figura 9 Canal de agua del laboratorio de Termociencias.

Al realizar las pruebas aerodinámicas en el canal, se obtuvo una velocidad ( $U(Z)$ ) de avance del flujo casi constante (flujo semi-tapón) en dirección axial de la sección transversal del canal. Además, la intensidad de la turbulencia  $I(Z)$  fue muy baja ( $I(Z) = 6\%$ ). En la Figura 10 se puede observar en línea negra el perfil de velocidades del flujo del canal en dirección  $Z$ , el modelo se colocó a una altura de 15 cm, donde las velocidades axiales casi no fluctúan. En línea roja se tiene el porcentaje de la intensidad de la turbulencia, la cual para experimentos en túneles de viento se recomienda un valor del 2 %, pero, para canales de agua no existe una recomendación específica, por lo cual se utilizó el mejor porcentaje obtenido en el canal, 6 %.

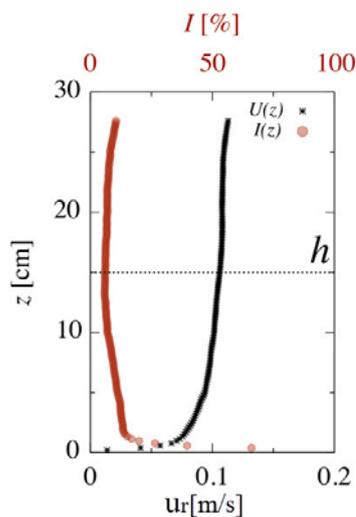


Figura 10 Perfil de velocidad axial  $U$ , línea negra, y de la intensidad de la turbulencia ( $I$ , línea roja) para el flujo del canal de agua. Canal de agua del laboratorio de Termociencias.

Procesando las imágenes del experimento con la técnica de PIV, se obtienen los campos de velocidad del flujo alrededor del modelo. Se observó que la capa límite se conserva con un espesor uniforme alrededor de la superficie del modelo y en su cola una estela suave se forma con una velocidad normalizada promedio de 0.5, respecto a  $U_r$ , que es la velocidad promedio del flujo del canal (Figura 11).

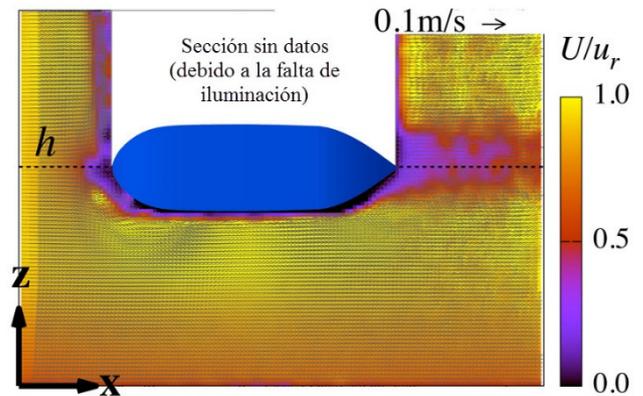
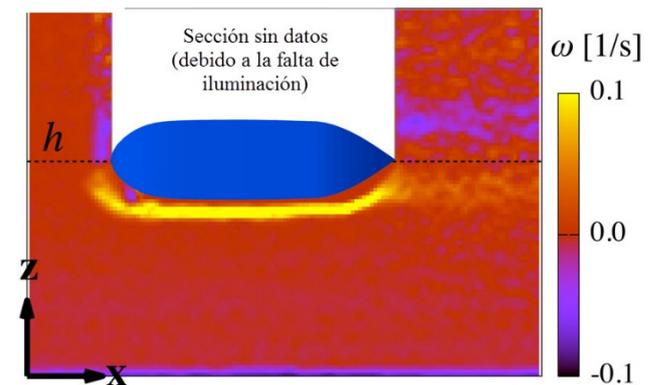


Figura 11 Campo de velocidades normalizado con respecto a  $U_r$  (velocidad promedio del flujo del canal).

La Figura 12 muestra el mapa de la vorticidad en el plano de observación para el modelo a escala. Se observa claramente que se tienen dos estructuras cilíndricas que se forman en dirección de flujo, la primera positiva sobre la superficie superior del modelo y la segunda negativa sobre la superficie inferior del modelo. Las estructuras están presentes desde la cabeza hasta la cola. En la Figura 12 se observa un área blanca sin datos experimentales a consecuencia de la opacidad del modelo. Los resultados experimentales muestran que la componente vertical de velocidad es más baja que la componente de velocidad en sentido del flujo del canal, lo cual indica que la forma aerodinámica diseñada



cumple con los criterios que se establecieron.

Figura 12 Campo de vorticidad normalizado alrededor del modelo de la canastilla aerodinámica.

## 5. Manufactura y ensamble de las nuevas canastillas

Durante el maquinado de los perfiles se detectaron problemas en el mecanizado.

El primero consistió en la colisión del mandril de la CNC con el material que se estaba trabajando. Para solucionar este inconveniente, se calculó la trayectoria del mandril al momento del maquinado, como se muestra en la figura 13.

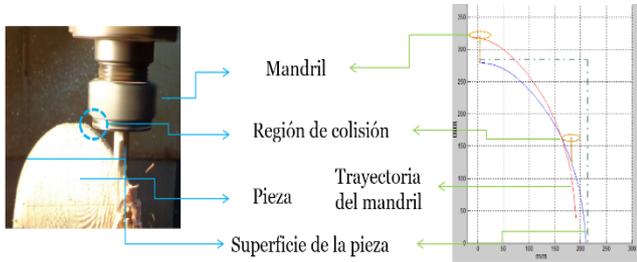


Figura 13 Trayectoria de colisión del mandril de la CNC.

Con los puntos de colisión determinados se optó por dividir la pieza en tres y dos secciones para la cola y la nariz respectivamente (Figura 14-3). Otro problema fue el mecanizado del material, debido a las dimensiones de las piezas y la vibración de la mesa de trabajo. La solución fue realizar el desbaste del material en dos etapas, en la primera se desbastaba el material de forma rápida y gruesa como se puede apreciar en la Figura 14-1 y en la segunda etapa un mecanizado lento que se llevó a cabo para dar el acabado final (Figura 14-2). La Figura 14-4 muestra el modelo a escala real de la cola de la canastilla terminada.

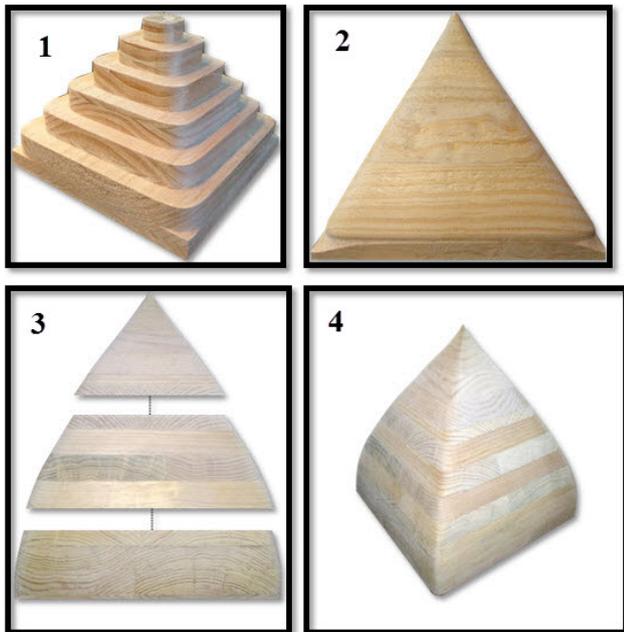


Figura 14 Etapas del mecanizado de la canastilla, 1) desbaste rápido, 2) desbaste lento, 3) secciones de la cola de la canastilla y 4) acabado final en madera de la cola de la canastilla

## 6. Conclusiones y trabajo a futuro

Se logró el diseño y la construcción de una nueva canastilla aerodinámica para la centrífuga del Laboratorio de Termociencias del IER-UNAM (Figura 15). Para afrontar este reto, se propuso un perfil aerodinámico basado en un perfil NACA y la ecuación de la elipse. Antes de la manufactura de los diferentes componentes de la canastilla, se realizó una simulación para comprobar la efectividad de la geometría para no producir vórtices y desprendimiento de la capa límite. Se consideró en la simulación un caso en dos dimensiones, un ángulo de ataque igual a cero, esto último debido a que la canastilla no puede estar inclinada longitudinalmente. Sin embargo, si puede rotar sobre el eje formado por la cuerda del perfil aerodinámico, pero, el área del frente expuesta al flujo de aire es la misma sin importar el ángulo de rotación, por lo cual, permite realizar la simulación sin considerar la rotación de la canastilla. Los resultados numéricos muestran un comportamiento suave del flujo de aire alrededor del perfil sin desprendimiento de vórtices (Figura 5 y Figura 6). Estos resultados fueron validados mediante las pruebas experimentales realizadas sobre un modelo a escala (1:7) en un túnel de agua. Teniendo resultados satisfactorios (Figura 11 y Figura 12).



Figura 15 Nueva canastilla para la centrífuga del Laboratorio de Termociencias.

## Agradecimientos

Se agradece a J. A. Cruz-Martínez, J. A. Flores Neri, F. Navarro Martínez, M. Flores López por su apoyo el estudio básico en aerodinámica, diseño mecánico y conexiones eléctricas de la canastilla. A Jaime Villalobos y Rogelio Morán por la manufactura de los perfiles y asistencia técnica. Y a José Luis Luviano por su apoyo y soporte técnico en simulación de fluidos.

## REFERENCIAS

- [1] Zander V, Anken R., Pesquet T., Brungs S and Latsch J., Short Radius centrifuges – A new approach for Life Science experiments under Hyper-g conditions for applications in space and beyond, Recent Patents on Space Technology, 3, 74-81,2013.

- [2] Regel L, Wilcox W., Material processing in High Gravity, Plenum Press, New York, USA. 1994.
- [3] Regel L, Wilcox W., Processing by centrifugation, Springer ISBN-10: 0306466546 ISBN-13: 978-0306466540, 2001.
- [4] Dong-Soo Kim, Nam-Ryong Kim, Yun Wook Choo, and Gye-Chun Cho, A Newly Developed State-of-the-Art Geotechnical Centrifuge in Korea, KSCE Journal of Civil Engineering, 17(1):77-84, 2013, DOI 10.1007/s12205-013-1350-5.
- [5] Aklik P. W. Wu, Centrifuge model tests on foundation geosynthetic reinforced slope, Institute of Geotechnical Engineering, University Natural Resources and life sciences, Sciences, Vienna Austria, Proceedings of the 18 th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- [6] Belloni G., Girotti A., Carfagni M. Using explosives to simulate earthquakes in a centrifuge, Transactions on the Built Environment vol 14, WIT Press, ISSN 1743-3509, 1995.
- [7] Vargas M., Ramos E. Ascanio G., Espejel R. Hernández-Cruz G., Ocampo G. A centrifuge for studies of fluid dynamics phenomena in a rotating frame of reference. Revista Mexicana de Física. 2002.
- [8] White F., Fluid Mechanics, Fifth edition McGraw Hill, 2010.
- [9] Loptin L.K., Jr., Theoretical and experimental data for a number of NACA 6A series airfoil sections, Report No. 903, 1947
- [10] Cruz Martínez Jorge, Diseño e instrumentación de las canastillas de una centrífuga para experimentos de convección y solidificación, Reporte de residencia profesional, Instituto Tecnológico de Zacatepec, 2013.