

# RONNA

JULIO  
2025

Metrología fundamental y aplicada

Volumen 3 | Ejemplar 1 | Primer semestre 2025



LABORATORIO  
COSTARRICENSE  
DE METROLOGÍA

GOBIERNO  
DE COSTA RICA

# Revista Ronna

Volumen 3. Ejemplar 1. Primer semestre de 2025.

## Índice de contenidos

Quinta Edición de la Revista Ronna .....	2
Diseño, construcción y caracterización de un túnel de viento subsónico de circuito abierto para la calibración de anemómetros en el Laboratorio Costarricense de Metrología .....	3
Medición de la tensión superficial por el método del anillo: introducción a la metrología y al estado de la implementación en el Lacomet .....	14

## Quinta Edición de la Revista Ronna

El Lacomets como Instituto Nacional de Metrología (INM) de Costa Rica es el organismo responsable de difundir, fundamentar, desarrollar, promover y mantener la estructura metroológica nacional. Esto lo logra a través de sus laboratorios especializados en desarrollar diferentes magnitudes físicas y químicas de acuerdo con las necesidades del país. Cada uno de estos laboratorios disemina su unidad del Sistema Internacional de Unidades correspondiente a través de servicios de calibración, verificación o ensayo. En pro de la mejora continua, estos se mantienen constantemente desarrollando procesos de investigación, desarrollo e innovación orientados hacia los siguientes objetivos institucionales:

Ampliar el alcance cubierto (ámbito de medición) y mejorar la exactitud de los servicios de medición y calibración actuales.

Desarrollar capacidades de medición nuevas que satisfagan las necesidades de trazabilidad de los usuarios de la metrología.

En ese sentido, el laboratorio de flujo de gases, uno de los más nuevos del Lacomets, se ha dado a la tarea de desarrollar métodos para la calibración de anemómetros (instrumentos para medir la velocidad del viento) a raíz de las múltiples solicitudes de calibración de estos equipos que se han recibido en años recientes. La construcción y caracterización de un túnel de viento es un paso firme hacia la apertura de este nuevo servicio de calibración. Por otro lado, el laboratorio de densidad, ante la necesidad de mejorar sus capacidades de medición y reducir incertidumbres, se encuentra

implementando un método para la determinación de la tensión superficial de líquidos, indispensable para realizar correcciones en mediciones de alta exactitud en magnitudes como densidad, viscosidad y presión entre otras. Adicionalmente, el desarrollo de estas mediciones es un paso hacia adelante para el desarrollo de materiales de referencia en densidad y viscosidad, necesarios en la industria química y alimenticia.

Sobre estos temas, en esta edición de la Revista Ronna nos complace presentar 2 artículos científicos que demuestran una vez más la capacidad del Lacomets para realizar proyectos de investigación en metrología aplicada, que prometen ampliar y fortalecer los servicios de medición y calibración y fortalecer la estructura metroológica nacional. Adicionalmente, son un ejemplo de la capacidad de generar vínculos con la academia, a través de proyectos de graduación o pasantías de estudiantes de pregrado y/o postgrado. Esperamos que sean de su agrado.



**Fernando J. Andrés Monge** / Director General Lacomets

# Diseño, construcción y caracterización de un túnel de viento subsónico de circuito abierto para la calibración de anemómetros en el Laboratorio Costarricense de Metrología

**Wilson Cen-Liang.** Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Email: [wilson.cen@ucr.ac.cr](mailto:wilson.cen@ucr.ac.cr)

**Luis Diego Guzmán-Guillén.** Departamento de Metrología Física. Lacomel, Costa Rica. Email:

[lguzman@lacomet.go.cr](mailto:lguzman@lacomet.go.cr)

**Resumen:** En este artículo se presenta el diseño, construcción y validación del túnel de viento subsónico del Laboratorio de Flujo y Gases del Laboratorio Costarricense de Metrología (Lacomel), el cual se desarrolla con el propósito de brindar servicios de calibración de anemómetros a nivel nacional. Con base en los ensayos de caracterización realizados, se generó la curva de funcionamiento del túnel de viento, se obtuvo una uniformidad de flujo promedio en la zona de calibración menor al 0,81 % y una intensidad de turbulencia menor al 1,59 % en un rango de velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Finalmente, se concluye que el túnel de viento es capaz de calibrar anemómetros cuya área proyectada no supere el 5 % del área transversal de la sección de pruebas en todo el rango estudiado.

**Palabras clave:** Intensidad de turbulencia, método Bell-Mehta, metrología, perfil de velocidad, uniformidad de flujo, velocidad del viento.

## 1. Introducción

Los anemómetros son instrumentos de medida de la velocidad del viento ampliamente utilizados en sectores como la meteorología, aeronáutica, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), industria farmacéutica, energía eólica, construcción, entre otros [1]; donde la calidad y velocidad del aire son parámetros que deben ser monitoreados de manera continua. Todo instrumento de medición requiere de una calibración cada cierto período de tiempo para garantizar la precisión y exactitud de sus resultados, y los anemómetros no son la excepción, por lo que generalmente se utilizan túneles de viento para su calibración. Un túnel de viento de baja velocidad posee una amplia aplicabilidad, que destacan por nombrar algunos: la observación de perfiles de flujo y

medición de fuerzas sobre objetos diversos, el estudio de la susceptibilidad a propagación de incendios o gases, la caracterización de generadores eólicos, la visualización de cargas dinámicas y vibraciones sobre construcciones, la caracterización de patrones de erosión en terrenos, y procedimientos de calibración [2] como es en este caso.

Actualmente, de acuerdo a los alcances de acreditación publicados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) [3], Costa Rica no cuenta con ningún laboratorio que ofrezca servicios de calibración de anemómetros acreditado. Por consiguiente, las empresas e instituciones que requieren calibrar estos instrumentos deben recurrir a laboratorios en el extranjero equipados con la instrumentación necesaria para obtener calibraciones trazables y aceptadas

internacionalmente, lo que representa costos adicionales asociados al transporte y a la logística internacional. A pesar de que a nivel nacional existe una cantidad no despreciable de túneles de viento, ninguno de ellos ha sido diseñado específicamente para la calibración de anemómetros. Por ejemplo, la Universidad de Costa Rica cuenta con cuatro túneles de viento: tres pertenecen a la Facultad de Ingeniería [4], [5] y uno a la Escuela de Arquitectura [6], mientras que el Instituto Tecnológico de Costa Rica dispone de otro en la Escuela de Electromecánica [7]. Todos ellos se utilizan principalmente con fines académicos y de investigación. Por esta razón, y en concordancia con el marco de objetivos del Plan Estratégico Institucional (PEI) del Laboratorio Costarricense de Metrología de ampliar la oferta de servicios disponibles a la población costarricense para proporcionar trazabilidad metrológica nacional, el Laboratorio de Flujo de Gases desarrolla la construcción de un túnel de viento subsónico, con el propósito de calibrar anemómetros en un rango de velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

El diseño de túneles de viento varía considerablemente según su campo de aplicación, y existe una amplia variedad de referencias al respecto. Por ejemplo, el túnel de viento anecoico de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong (HKUST) está diseñado para estudios aeroacústicos y tiene como objetivo minimizar la interferencia acústica mediante el uso de una cámara anecoica en un entorno de flujo controlado [8]. En contraste, el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRC) dispone de un túnel de viento orientado a la investigación de fenómenos de congelamiento marino, el cual está diseñado para replicar condiciones climáticas extremas de baja temperatura y simular spray congelante o precipitaciones intensas

mediante la inyección de agua dulce o salada [9]. Dado el contexto, las decisiones de diseño del túnel de viento del Lacomet, orientado específicamente a la calibración de anemómetros, se sustentan en diversas fuentes técnicas [10], [11], [12], [13], que abordan aspectos del diseño de la configuración geométrica de la sección de pruebas, la relación óptima de áreas de la contracción y del difusor, el ángulo crítico del difusor, la proporción entre longitudes y diámetro hidráulico de las secciones, así como el uso de pantallas de control de turbulencia y alineadores de flujo. Además, se describen métodos para estimar las pérdidas por fricción a lo largo del circuito, las cuales son necesarias para dimensionar la potencia mínima requerida del motor para alcanzar las velocidades objetivo. En el presente trabajo se documenta el proceso de diseño y construcción, así como la validación del túnel de viento conforme a los lineamientos establecidos en las normas IEC 61400-12-1 [14] y ASTM D5096-24 [15] y el procedimiento de la guía *Anemometer Calibration Procedure* de la MEASET [16], finalizando con su respectiva caracterización.

## 2. Diseño y Construcción

El diseño del túnel de viento se realizó a partir del planteamiento de las necesidades, objetivos y capacidades de la institución, tomando en consideración el espacio disponible para su instalación, el presupuesto asignado al proyecto y los métodos de manufactura compatibles con los equipos a disposición. Un túnel de viento subsónico de circuito abierto se compone principalmente de una sección de estabilización, una contracción, una sección de pruebas, un difusor y un ventilador, ya sea axial o centrífugo. Todas estas secciones son necesarias para generar un régimen laminar en la zona de calibración. La sección de

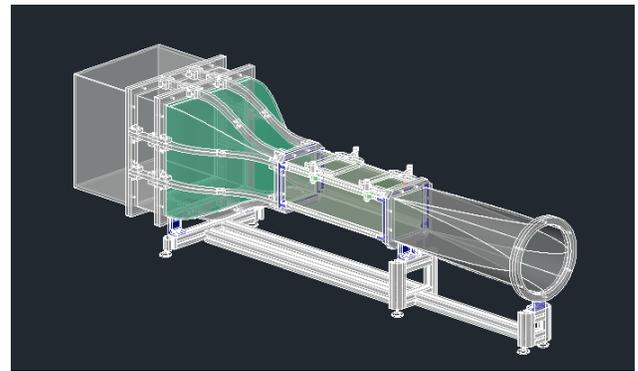
pruebas es la zona principal de un túnel de viento, ya que es ahí donde se realiza la calibración de los anemómetros. Por ello, generalmente se empieza con el diseño de dicha sección, definiendo el área de la sección y la velocidad del viento que se desea alcanzar. Para el túnel de viento en cuestión, se utilizó una lámina de acrílico de 5 mm de espesor para su construcción, la cual fue cortada con láser en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

La contracción es el elemento más crítico en un túnel de viento, puesto que se encarga de acelerar el flujo proveniente de la sección de estabilización y dirigirlo hacia la sección de pruebas para alcanzar la velocidad deseada. Un diseño adecuado de la contracción permite adelgazar al máximo la capa límite en las paredes a la entrada de la sección de pruebas en todo el ámbito de velocidades de operación, disminuir la turbulencia y garantizar la uniformidad de flujo a lo largo de dicha sección. La ecuación polinomial de Bell-Mehta [17] es un método ampliamente utilizado para el diseño de la contracción en túneles de viento, por lo que se empleó la ecuación polinomial de séptimo orden para el diseño. La estructura para generar la curvatura se realizó mediante impresión 3D y las paredes fueron revestidas con formica.

La sección de estabilización es la zona ubicada antes de la contracción donde se localizan las pantallas y alineadores de flujo, que cumplen la función de reducir la vorticidad y variaciones de velocidad en dirección del flujo que provienen de la entrada del túnel de viento. En este caso, se utilizó un alineador de flujo tipo honeycomb impreso en 3D y dos pantallas tipo cedazo. Después de la sección de pruebas se encuentra el difusor, cuya función es reducir la velocidad del flujo con la menor pérdida de energía posible, lo que resulta en una mayor recuperación de presión después de la

sección de pruebas. Este elemento se manufacturó con una lámina galvanizada.

El diseño preliminar del túnel de viento correspondía al mostrado en la figura 1 que utilizaba un ventilador centrífugo de baja potencia. Sin embargo, con la adquisición del ventilador axial (amarillo) de mayor potencia y tamaño mostrado en la Figura 2, fue necesario construir una extensión de cono difusor fabricada de lámina galvanizada para acoplar el ventilador al túnel de viento por medio de una lona flexible. En el CUADRO I se muestran los parámetros y características de diseño que se emplearon para la construcción del túnel de viento.



**Figura 1.** Diseño del túnel de viento en AutoCAD.



**Figura 2.** Túnel de viento puesto en operación en el LACOMET.

**CUADRO I.** Dimensiones y parámetros de diseño del túnel de viento del LACOMET

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud total del túnel de viento	2,216	m
Altura máxima del túnel de viento	0,440	m
Longitud de sección de estabilización	31	cm
Cantidad de pantallas de estabilización	2	1
Cantidad de alineadores de flujo	1	1
Relación de áreas de la contracción	7:1	1
Dimensión de la sección de pruebas	11x11x38	Cm
Relación de áreas del difusor	2:1	1
Ángulo del difusor	4	°
Velocidad del viento mínima	2,5	m s <sup>-1</sup>
Velocidad del viento máxima	30	m s <sup>-1</sup>
Potencia del ventilador	520	W
Velocidad de rotación del ventilador	2900	rpm

### 3. Sistema de Adquisición de Datos

Para controlar la velocidad del viento dentro de la sección de pruebas, se desarrolló una interfaz en LabVIEW que permite ajustar la velocidad de rotación del ventilador mediante un módulo Dimmer AC y un encoder rotativo, ambos conectados a un microcontrolador ESP32 configurado con un control PID. Las condiciones ambientales internas del túnel de viento, como la temperatura, se obtiene utilizando un termistor, mientras que la presión se obtiene empleando un sensor BME280. Para las condiciones ambientales del cuarto (temperatura, presión y humedad relativa), se utiliza un medidor de condiciones ambientales modelo PCE-THB 40. La

humedad relativa dentro del túnel se considera igual que la registrada por el medidor de condiciones ambientales del cuarto. La presión diferencial se mide con un transmisor digital de presión diferencial Meriam modelo ZM1500-DN0010.

La velocidad del viento dentro de la sección de pruebas se calcula siguiendo los lineamientos de la norma ISO 3966:2008 [18], empleando los datos de temperatura, presión diferencial, presión atmosférica y la densidad del aire dentro del túnel; esta última calculada siguiendo la ecuación CIPM-2008 [19]. Se consideran y aplican las correcciones especificadas en los certificados de calibración de cada instrumento y sensor utilizados en la medición, junto con la evaluación e incorporación de sus correspondientes componentes de incertidumbre. Para la medición de velocidades y fluctuaciones de flujos dentro del túnel de viento, existen diversos principios que incluyen principalmente la anemometría Láser-Doppler (LDV), anemometría de imágenes de partículas (PIV), anemometría interferométrica por dispersión de Rayleigh (IRS), y anemometría de hilo caliente (HWA) [20]. Para el túnel de viento construido, se emplea un tubo de Pitot tipo L como patrón para determinar la velocidad del viento y un anemómetro de hilo caliente para la medición de turbulencia dentro de la sección de pruebas.

### 4. Criterios de Validación

Para que un túnel de viento se considere un equipo apto para la calibración de anemómetros, este debe cumplir ciertos requerimientos establecidos por normativas, los cuales se especifican a continuación.

## 4.1. Relación de bloqueo

Según la práctica recomendada asociada a la IEC 61400-12-1, en túneles de secciones cerradas se establece que la relación entre el área transversal efectiva del anemómetro y la sección de pruebas no debe superar el 5 %, de modo que los efectos de bloqueo puedan ser considerados despreciables.

## 4.2. Capacidad de la velocidad del viento

Debe poder generar una velocidad del viento entre  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  de manera controlada.

## 4.3. Uniformidad de flujo

La variación máxima de velocidad en el área de calibración no debe exceder el 0,2 % del valor medio de velocidad según la IEC 61400-12-1 ó el 1 % según la D5096-24.

## 4.4. Gradiente horizontal del viento

El flujo entre los laterales y el centro de la sección de pruebas debe ser menor al 0,2 % para garantizar la uniformidad de flujo.

## 4.5. Intensidad de turbulencia

La turbulencia en la sección de pruebas debe ser menor al 2 % según la IEC 61400-12-1 ó al 1 % según la D5096-24.

## 4.6. Uniformidad de la densidad del aire

Acepta una variación hasta del 3 % en la densidad del aire dentro de la sección de pruebas.

## 4.7. Adquisición de datos

Debe poder mantener una resolución de muestreo de  $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  con una frecuencia de al menos 1 Hz por 30 segundos.

## 5. Caracterización del Túnel de Viento

### 5.1. Curva de funcionamiento

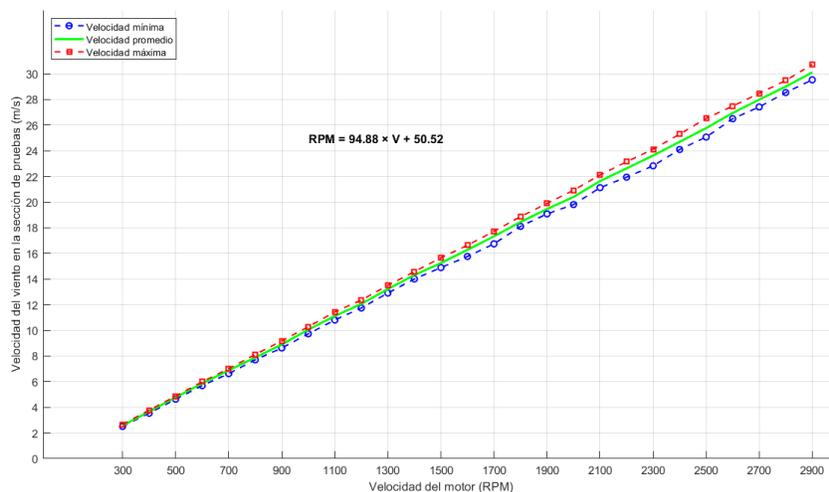
Para obtener una ecuación práctica que permitiera estimar la velocidad de rotación del motor para una determinada velocidad del viento, se generó la curva del funcionamiento del motor que se muestra en la figura 3. Por medio de una regresión lineal, se obtiene la ecuación (1) para determinar las revoluciones por minuto del motor en función de la velocidad del viento.

$$RPM = 94,88 \cdot V + 50,52 \quad (1)$$

Donde:

RPM es la velocidad de rotación del motor (rpm).

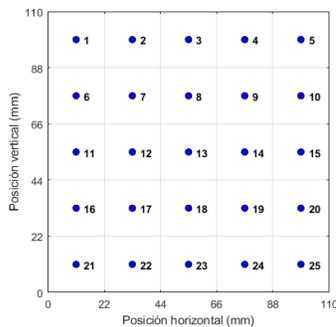
V es la velocidad del viento deseada ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 3.** Curva de funcionamiento del túnel de viento del Laboratorio Costarricense de Metrología

## 5.2. Uniformidad de flujo

Las mediciones para generar el perfil de velocidad con el objetivo de evaluar la uniformidad de flujo se realizaron utilizando un tubo de Pitot Dwyer 160E-02. Para ello, se estableció un mallado de 25 puntos en el área transversal dentro de la sección de pruebas, con una separación de 22 mm entre cada punto, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Esquema de los puntos de medición de la sección de pruebas del túnel de viento.

La uniformidad de flujo se determina con la ecuación (2).

$$\mu_i = \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \cdot 100 \quad (2)$$

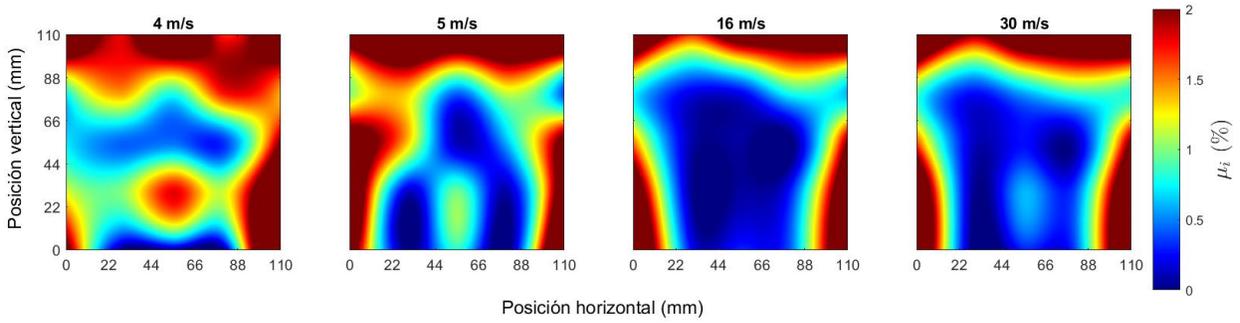
Donde:

$\mu_i$  es la uniformidad de flujo (%).

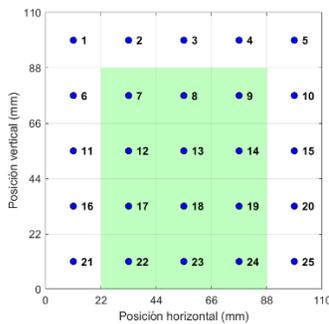
$u_i$  es la velocidad del viento instantánea ( $m \cdot s^{-1}$ ).

$\bar{u}$  es la velocidad del viento promedio ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Se realizaron tres series de toma de datos para cada punto del mallado, a velocidades de  $4 m \cdot s^{-1}$ ,  $5 m \cdot s^{-1}$ ,  $16 m \cdot s^{-1}$  y  $30 m \cdot s^{-1}$ . El perfil para evaluar la uniformidad de flujo para cada velocidad seteada se presenta en las figura 5. La variación del flujo presenta un comportamiento más uniforme en la sección 3x4, representada en color verde en la figura. 6, por lo que se considera dicha región como la zona de calibración. Sin embargo, en velocidades bajas de  $4 m \cdot s^{-1}$  y  $5 m \cdot s^{-1}$ , se identifican ciertas regiones del perfil donde la variación del flujo alcanza valores mayores al 1 % permitido por la normativa. En contraste, cuando se trabaja a altas velocidades, la zona de calibración presenta variaciones menores al 1 %, lo que denota una óptima distribución del flujo en el perfil estudiado. En velocidades de  $16 m \cdot s^{-1}$  se obtuvo una uniformidad de flujo promedio en la zona de calibración de 0,30 %, y para  $30 m \cdot s^{-1}$  de 0,38 %. Siguiendo el mismo análisis, en  $4 m \cdot s^{-1}$  se obtuvo una variación promedio de 0,81 %, y para  $5 m \cdot s^{-1}$  de 0,63 %, aun cuando algunas regiones puntuales dentro de la zona de calibración presentan variaciones superiores al 1 % permitido. Las paredes laterales y la pared superior son las zonas que presentan un mayor gradiente de velocidad, alcanzando variaciones de hasta 4,03 % en el punto 1 para la velocidad de  $30 m \cdot s^{-1}$ . En todos los perfiles evaluados se observa una heterogeneidad de flujo concentrado en las esquinas de la sección de pruebas, lo cual es un comportamiento esperado, pero no deseado.



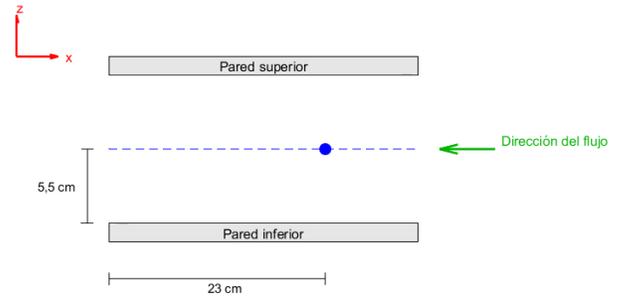
**Figura 5.** Uniformidad de flujo en la sección de pruebas del túnel de viento del Laboratorio Costarricense de Metrología para velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



**Figura 6.** Zona de calibración de la sección de pruebas del túnel de viento.

### 5.3. Intensidad de turbulencia

Se realizaron tres series de toma de datos para obtener la intensidad de turbulencia a velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , de acuerdo con lo estipulado en la norma IEC 61400-12-1, y a  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con el fin validar todo el rango de operación del túnel de viento. Para ello, se utilizó un anemómetro de hilo caliente Kanomax 6501-OE, colocado en el cuadrante 13 de la figura 4 y ubicado dentro de la sección de pruebas como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Esquema de la posición del anemómetro de hilo caliente en la sección de pruebas del túnel de viento.

El método para estimar la intensidad de turbulencia [21] se denota en la ecuación (3). Los resultados de la intensidad de turbulencia para las velocidades estudiadas se observan en la figura. 8.

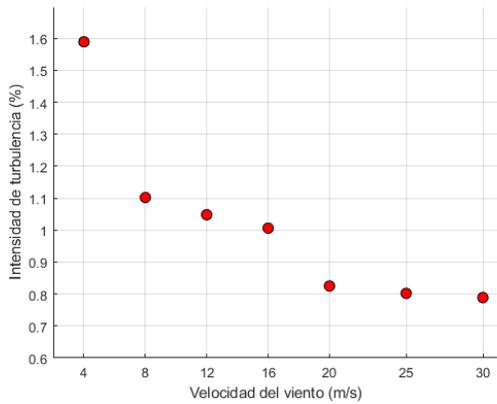
$$I = \frac{u'}{U} \quad (3)$$

Donde:

I es la intensidad de turbulencia.

$u'$  es la desviación estándar de la velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

U es el promedio de la velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 8.** Intensidad de turbulencia en la sección de pruebas del túnel de viento en función de las velocidades seteadas.

Se puede notar que, en todo el rango de operación del túnel de viento, desde los  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  hasta los  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , el valor de la intensidad de turbulencia se mantiene dentro de los valores de  $0,79 \%$  y  $1,59 \%$ . Además, se observa una tendencia decreciente del valor de la turbulencia a medida que se aumenta la velocidad del flujo en el túnel de viento, un comportamiento común asociado al número de Reynolds.

## 6. Conclusiones

Se logró diseñar y construir un túnel de viento orientado a la calibración de anemómetros gracias al personal del Laboratorio de Flujo de Gases y al equipo del Departamento de Física del Lacomet. Además, en el rango de operación de  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , se verificó que la uniformidad de flujo cumple con la norma ASTM D5096-24 y se aproxima al límite establecido por la IEC 61400-12-1. En cuanto a la intensidad de turbulencia, si bien excede el umbral del  $1 \%$  definido en la ASTM D5096-24, se mantiene por debajo del  $2 \%$  permitido por la IEC 61400-12-1. En el ámbito de bajas velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , aunque no cumpla la uniformidad de flujo en todos los puntos de la zona de calibración, y por ende, no cumpla

con la normativa, se puede justificar la capacidad del túnel de viento para la calibración de anemómetros a dichas velocidades, siempre y cuando en el proceso de calibración, se cuantifique y se adicione una componente de incertidumbre asociada a la desviación con respecto a la velocidad media.

El túnel de viento es apto para calibrar anemómetros con un área proyectada no mayor al  $5 \%$  del área de la sección transversal de la sección de pruebas, en un rango de velocidades de  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , incluyendo las incertidumbres adicionales necesarias cuando la uniformidad de flujo no cumple en su totalidad con los criterios normados dentro de la zona de calibración. A pesar de haber cumplido con el objetivo de construir un túnel de viento funcional para la calibración de anemómetros, todavía queda mucho trabajo de investigación y mejoras por realizar con el fin de alcanzar valores de uniformidad de flujo e intensidad de turbulencia comparables con los del Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) en Brasil ( $\mu_{li} = \pm 0,2 \%$ ,  $I < 0,4 \%$ ) [22] y del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) en México ( $\mu_{li} < 1 \%$ ,  $I < 0,7 \%$ ) [23].

### 6.1. Futuras investigaciones

- Se recomienda estudiar con más detalle el perfil de velocidad en el rango de  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , sin embargo, no se espera un comportamiento significativamente diferente a lo reportado.
- Se plantea realizar mediciones del perfil de velocidad en el rango operativo de  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , para

identificar la mínima velocidad que cumple con una uniformidad de flujo estable y dentro del límite establecido por la normativa, con el objetivo de determinar hasta qué velocidad debe aplicarse la componente de incertidumbre adicional asociada a los puntos del perfil que presentan variaciones de velocidad superiores al 1 %.

- Es necesario analizar los componentes antes de la sección de pruebas (contracción y sección de estabilización) para identificar posibles anomalías que estén provocando la baja uniformidad de flujo en la pared superior de la sección de pruebas. Una manera de comprobar si el error de uniformidad de flujo se origina antes de la cámara de pruebas consiste en girar la

contracción y sección de estabilización unos 180° para visualizar si el perfil de velocidad se invierte o sigue presentando una baja uniformidad en la pared superior de la sección de pruebas.

- Una posible mejora que se necesita evaluar experimentalmente es la adición de un elemento de tropiezo [24], puede ser una superficie rugosa, ubicado al inicio de la sección de pruebas, con el objetivo de retardar el adelgazamiento de la capa límite a lo largo de dicha sección. Otra opción es colocar un ángulo muy pequeño al final de la contracción que cumpla la misma función, para evaluar si el flujo en la sección de pruebas mejora, tanto en uniformidad de flujo como en intensidad de turbulencia.

## 7. Referencias

- [1] W. Zhou, X. Liu, L. Zhang, W. Liu y L. Yang, “Comparative Study on Anemometer Calibration of Two Kinds of Wind Tunnel Devices with Different Structures”, en Proc. 2023 IEEE 16th Int. Conf. Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2023, pp. 284–288. doi: 10.1109/ICEMI59194.2023.10269890.
- [2] J. G. Monge Gapper, “Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad”, Ingeniería, vol. 16, n.º 2, pp. 45–54, jul. 2011, doi: 10.15517/ring.v16i2.665.
- [3] Ente Costarricense de Acreditación (ECA), “Laboratorios de calibración”. [En línea]. Disponible en: <https://eca.or.cr/laboratorios-de-calibracion/> [accesado: jun. 14, 2025].
- [4] Universidad de Costa Rica, “Un túnel para medir resistencia de puentes y edificios”, UCR Noticias, jul. 15, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2005/7/15/un-tunel-para-medir-resistencia-de-puentes-y-edificios/> [accesado: jun. 14, 2025].
- [5] Laboratorio de Investigación en Energía Eólica, “Visita Escuela Ingeniería Mecánica UCR”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, ago. 27, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/reporte\\_tecnico\\_vista\\_tunel\\_ucr.pdf](https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/reporte_tecnico_vista_tunel_ucr.pdf) [accesado: jun. 14, 2025].
- [6] Universidad de Costa Rica, “Equipo de análisis ambiental”, Arquis UCR, [En línea]. Disponible en: <https://arquis.ucr.ac.cr/estudiar-arquitectura/servicios/equipo-analisis-ambiental.html> [accesado: jun. 14, 2025].

- [7] F. Garro Fernández, C. A. Echandi Jara, E. Fallas Hernández, M. Zúñiga Pepper, y G. Richmond Navarro, “Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico de circuito abierto”, *TM*, vol. 38, n.º 1, pp. 128–144, dic. 2024, doi: 10.18845/tm.v38i1.7051.
- [8] W. Yi et al., “Design and characterization of a multifunctional low-speed anechoic wind tunnel at HKUST”, *Aerospace Science and Technology*, vol. 115, p. 106814, aug. 2021, doi: 10.1016/J.AST.2021.106814.
- [9] M. Garvin and A. Kirchhefer, “Design and performance of an open-circuit marine icing wind tunnel”, *Applied Ocean Research*, vol. 157, p. 104510, apr. 2025, doi: 10.1016/J.APOR.2025.104510.
- [10] S. Mauro, R. Lanzafame, M. Messina, S. Brusca, F. Famoso y A. Galvagno, “Small-scale open-circuit wind tunnel: Design criteria, construction and calibration”, *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, pp. 13649–13662, dic. 2017.
- [11] R. D. Mehta y P. Bradshaw, “Design rules for small low speed wind tunnels”, *The Aeronautical Journal*, vol. 83, pp. 443–453, jul. 2016, doi: 10.1017/S0001924000031985.
- [12] Arango Duque y J. M. Yepes Murillo, “Diseño, construcción y puesta en funcionamiento del túnel de viento subsónico de circuito abierto de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá con implementación de sistemas de toma de datos de aire y visualización de flujo”, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11371/3029>
- [13] J. B. Barlow, W. H. Rae y A. Pope, “Low Speed Wind Tunnel Testing”, 3rd ed., John Wiley and Sons, Hoboken, 1999.
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC 61400-12-1 — Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, 3rd ed., Geneva, Switzerland, 2022.
- [15] ASTM International, ASTM D5096-24 – Standard Test Method for Determining the Performance of a Cup Anemometer or Propeller Anemometer, West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [16] MEASNET, Anemometer Calibration Procedure, Version 3, dec. 2020.
- [17] J. H. Bell y R. D. Mehta, “Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels”, NASA Cooperative Agreement NCC-2-294, Ames Research Center, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA, 1988.
- [18] International Organization for Standardization, ISO 3966:2008 — Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot static tubes, Geneva, Switzerland, 2008.
- [19] Picard, R. S. Davis, M. Gläser, y K. Fujii, “Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)”, *Metrologia*, vol. 45, pp. 149–155, 2008, doi: 10.1088/0026-1394/45/2/004.
- [20] Y. Du, N. Xiong y J. Lin, “Analysis of Measurement Results of Dynamic Flow Quality in Probe Calibration Wind Tunnel”, en *Proc. 2021 2nd Int. Conf. Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM)*, feb. 2021, pp. 85–90. doi: 10.1145/3456529.3456543.
- [21] G. Richmond Navarro, R. F. Sanabria-Sandí, L. E. Castro Rodríguez, J. J. Rojas, y W. R. Calderón Muñoz, “Evolución vertical de la intensidad de turbulencia del viento en terreno complejo con obstáculos”, *TM*, vol. 35, n.º 7, pp. 46–57, ago. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i7.6332.

- [22] G. Nader, C. dos Santos, P. J. S. Jabardo, M. Cardoso, N. M. Taira, y M. T. Pereira, "Characterization of low turbulence wind tunnel", en Proc. XVIII IMEKO World Congress – Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, sep. 17–22, 2006.
- [23] R. Tolentino E., G. Tolentino E., and F. Sánchez S., "Hacia un patrón nacional de velocidad de aire en México", en Simposio de Metrología 2016, Querétaro, México, sep. 19–23, 2016.
- [24] M. R. Soltani, K. Ghorbanian, and M. D. Manshadi, "Application of screens and trips in enhancement of flow characteristics in subsonic wind tunnels", *Scientia Iranica, Trans. B: Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 1–12, feb. 2010.

# Medición de la tensión superficial por el método del anillo: introducción a la metrología y al estado de la implementación en el Lacomet

**Francisco Sequeira-Castro.** *Departamento de Metrología Física, Lacomet, Costa Rica. Email: [fsequeira@lacomet.go.cr](mailto:fsequeira@lacomet.go.cr)*

**Resumen:** Se realizó la caracterización inicial de la medición de la tensión superficial por el método del anillo, caracterizando en primera instancia el tensiómetro a partir de la comparación y el ajuste contra pesos determinados, y en segunda comparando modelos de corrección prescritos para el ajuste de las indicaciones. Se llevó a cabo una determinación simple de la tensión superficial del agua para habituarse al uso del equipo y a la caracterización de una sustancia. Se recomienda finalizar el proceso de validación del método para caracterizar la propiedad en sustancia utilizadas como patrones metroológicos.

**Palabras clave:**

## 1. Introducción

La tensión superficial es una propiedad física de los líquidos que es el resultado de las fuerzas intermoleculares en la superficie o límite del líquido con respecto a otra sustancia y que se manifiesta como la energía superficial del líquido requerida para realizar un cambio en el área de la película superficial [1]. La magnitud es importante en el estudio de los fenómenos de superficies, entre fases sólido- fluido o fluido- fluido [1].

Existen fenómenos de superficie importantes en los experimentos de calibración en densidad, que afectan la exactitud de los resultados. Para el caso de los hidrómetros, por ejemplo, el fenómeno de superficie entre el vástago y la superficie del fluido de inmersión, se manifiesta por la formación de un menisco. Se genera una columna que asciende cierta altura por la superficie del vástago sobre el nivel del fluido, lo que genera un equilibrio de peso que debe compensarse en la formulación de los resultados [2]. Otros procesos en densidad involucran fenómenos de superficie que requieren de corrección. Tal es el caso de los experimentos de pesada

hidrostática en los que se utilizan alambres de acero inoxidable que cruzan la superficie del fluido. La tensión superficial, dependiendo del grosor intrínseco del hilo y de su deformación radial por el peso, puede ser considerada como un efecto importante en la exactitud del método [3].

El estudio de la tensión superficial en capilares también es importante en el caso de la calibración de viscosímetros. Una corrección debe ser aplicada cuando existe una diferencia significativa entre la tensión superficial del fluido con el que se calibró un viscosímetro capilar y la del líquido a medir. Por lo general, puede considerarse que, para líquidos de misma naturaleza química, el efecto de apreciación del menisco durante la caída libre es similar. Pero en aplicaciones en las que se utilizan líquidos de diferentes polaridades y tensiones superficiales, especialmente el agua, puede haber un efecto significativo en la corrección de la constante de viscosidad para aplicaciones con fluidos de menor tensión superficial [4].

## 2. Funcionamiento del tensiómetro

El tensiómetro de anillo consiste en una balanza de brazos desiguales, a un lado del pivote se halla el brazo corto y en el otro el brazo largo con adaptación de gancho para unir el anillo. Una vez adaptado el anillo, el brazo baja a mínima posición. La diferencia con la balanza para masas radica en que la contrafuerza la aplica una tensión aplicada sobre un cable, mismo que funciona como pivote, en vez de las masas colocadas en el brazo corto en la balanza tradicional. Al aplicar tensión en el alambre mediante la acción de un micrómetro, se realiza una fuerza que levanta el brazo en el que cuelga el anillo. El funcionamiento se basa entonces en accionar tanta tensión sobre el alambre como permita el micrómetro hasta llegar a nivelar los brazos [5]. En la ecuación (1) se muestra el principio físico de ajuste de la tensión de un patrón  $T_s$  expresada en  $mN m^{-1}$ :

$$T_s = \frac{[m_{s,0} - V_{s,0}\rho_a[1 + \alpha(t - t_{ref})]] \cdot g}{2 \cdot (2\pi R_{prom})} \quad (1)$$

Donde:

$m_{s,0}$  es el valor de masa nominal de una pesa patrón en g;

$V_{s,0}$  es el volumen de la pesa patrón en  $cm^3$ ;

$\rho_a$  es la densidad del aire medida durante el ajuste en  $g cm^{-3}$ ;

$\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica de la pesa en  $^{\circ}C^{-1}$ ;

$t$  y  $t_{ref}$  son las temperaturas de ajuste y referencia respectivamente, en  $^{\circ}C$ ;

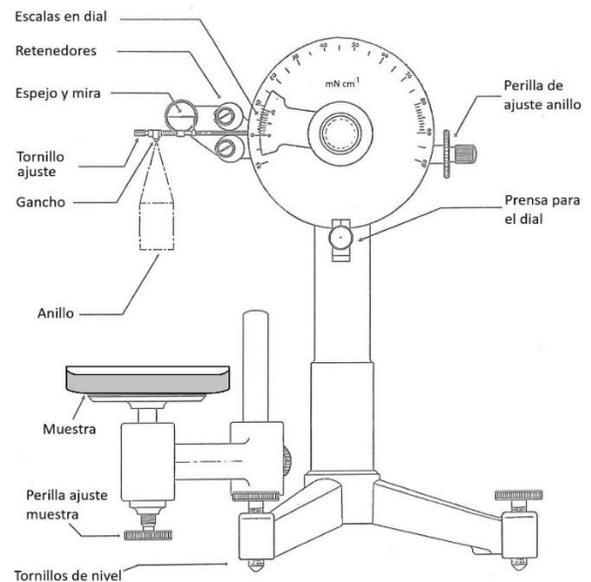
$g$  es la aceleración local de la gravedad en  $m s^{-2}$ ; y

$R_{prom}$  es el radio promedio del anillo en m.

El ajuste de la escala micrométrica se realiza comparando el valor obtenido de  $T_s$  y  $P_s$ , que es la indicación de la escala del tensiómetro.

### 3. Medición de la tensión superficial de un líquido

Al descender e introducir un anillo metálico bajo la superficie de un líquido y luego tirar de él para retirarlo del seno, se presenta una resistencia que sujeta la superficie del líquido al anillo que asciende con este. Cada vez que se tira del anillo, aumenta la resistencia del fluido contra el ascenso del mismo, generando un ascenso de la superficie del líquido unido al anillo hasta que llega un punto en el que el líquido rompe el contacto con el anillo y desciende a nivel de la superficie. El tensiómetro permite accionar el micrómetro con fineza para que se registre la indicación de la tensión que genera el líquido sobre el anillo. Es bien conocido que la indicación del equipo durante el experimento es proporcional a la tensión superficial del líquido en cuestión, pero que requiere de ciertas correcciones para que reflejen el fenómeno real a determinar [5].



**Figura 1.** Diagrama de un tensiómetro superficial de anillo. Modelo tomado y traducido al español de [5]

La tensión  $P$  que logra registrar el equipo corresponde a la máxima tensión a la que es sometido el anillo al levantarlo y romper la superficie del líquido, pero esta no es igual a la tensión superficial. Experimentalmente,

ocurren varios fenómenos físicos (adelgazamiento de las paredes del líquido en los perímetros del anillo y diferencia de presiones entre la parte superior e inferior del anillo) que influyen en la estimación de la tensión superficial. Por lo tanto, existen algunos modelos de corrección en la literatura, pero que difieren entre ellos en algunas aproximaciones del factor de corrección. Según [6], una aproximación válida para el modelo del factor de corrección se describe según la ecuación (2).

$$(F - a)^2 = \frac{(4b)}{(\pi R)^2} \cdot \frac{P}{D - d} + 0,04534 - 1,679 \cdot \frac{r}{R} \quad (2)$$

Donde:

$F^*$  es el factor de corrección multiplicativo de la tensión máxima registrada  $P$  en  $\text{mN m}^{-1}$ ;

$a$  y  $b$  son constantes para todos los anillos y corresponden a  $0,7250^*$  y  $0,0009075 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^2$ ;

$R$  es el radio promedio del anillo en  $\text{cm}$ ;

$D$  y  $d$  son las densidades del líquido y del aire respectivamente en  $\text{g cm}^{-3}$ ; y

$r$  es el diámetro del alambre del anillo en  $\text{cm}$ .

\* corresponden a la unidad 1

Según [7], algunas de las aproximaciones realizadas en estos modelos, son insuficientes para extrapolar a todas las posibles variables experimentales debido a las diferencias existentes en la comparación con los datos reportados por [8] y por [6] de los valores de la corrección de la tensión máxima  $F$  en función del valor de  $R^3/V$  (relación radio del anillo al cubo/volumen de líquido de ascenso de líquido).

## 4. Sección experimental

**Ajuste del tensiómetro:** Se comprobó la indicación del tensiómetro contra el valor de una fuerza conocida a través del uso de plomadas [9], valiéndose de la relación

descrita en la ecuación (1). Inicialmente se ajustó la tensión para que el micrómetro funcione dentro del ángulo descrito por las manecillas del reloj entre las 9 h y las 3 h, posteriormente se determinó la masa de tres plomadas adecuadas para las dimensiones del anillo. En este caso se utilizaron tres clips, cuyas características se muestran en el CUADRO I. Posteriormente se ajustó el brazo del tensiómetro de acuerdo al peso determinado a los clips, y se volvió a determinar la tensión experimental medida.

**CUADRO I** Resultados del ajuste de la escala del tensiómetro con respecto a pesos de referencia y comprobación de la desviación en la indicación. La ID final corresponde a la masa de ambos clips amarillo y verde (A+V) sobre el anillo.

ID pesa	Masa (g)	$T_s$ ( $\text{mN m}^{-1}$ )	Indicación ( $\text{mN m}^{-1}$ )	% Diferencia
Plata	0,3718	29,87	30,00	0,13
Amarillo	0,4501	36,16	36,25	0,09
Verde	0,4701	37,77	37,95	0,18
A+V	0,9202	73,93	74,05	0,12

La diferencia entre la indicación y la referencia  $T_s$  debe estar dentro de un ámbito de  $\pm 0,5 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ , lo cual implica un funcionamiento adecuado del equipo [10].

**Trazabilidad de los resultados:** Se analizaron las magnitudes de entrada en las ecuaciones (1) y (2) a fin de determinar la trazabilidad de los resultados de las mediciones. Magnitudes como la masa, el volumen y densidad de pesas, aire y líquido a medir, así como la temperatura, pueden ser determinadas mediante metodologías confiables disponibles en el laboratorio. La aceleración gravitacional está bien caracterizada en estudios previos [11]. Sin embargo, para la determinación de la circunferencia media y de la relación de radios, es requerido desarrollar métodos específicos y a la medida para la puesta a punto. Los resultados aquí presentes se

basan en los datos brindados por el fabricante, mismos que se muestran en el CUADRO II.

**CUADRO II:** Dimensiones del anillo de Noüy adquirido por el Lacomet.

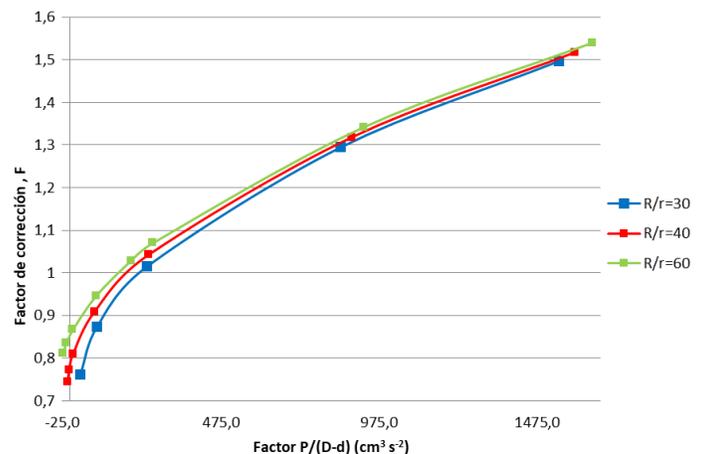
Magnitud	Valor de la magnitud
Circunferencia media, $2\pi R$	$6,086 \times 10^{-2} \text{ m}$
Relación radios, $\frac{R}{r}$	49,866

**Modelo del factor de corrección:** Según lo descrito en la ecuación (2), el modelo de medición de la tensión superficial corresponde a una ecuación diferencial, pues la variable a corregir está implícita dentro del factor de corrección. Otro detalle es que las diferencias externadas para los modelos por [7] pueden ser significativas. Sin embargo, según [12], la ecuación (2) es utilizada válidamente para corregir el valor de la tensión obtenida.

Para evaluar los diferentes efectos asociados a las dimensiones de los anillos utilizados por los autores de referencia y compararlos contra los del anillo del Lacomet, se tomaron los datos reportados por [7] para anillos con relaciones  $\frac{R}{r}$  de 30, 40 y 60; y utilizando la ecuación (2), se estimó la corrección  $F$  para un anillo específico con las dimensiones del que adquirió el Lacomet ( $R \approx 0,97 \text{ cm}$ ) lo que permite determinar un estimador específico que incluye los efectos por  $R/r$ ,  $R^3/V$  y  $F$ . Los valores obtenidos se muestran en la figura 2. Con estos resultados es posible determinar el valor de  $F$  teórico a partir de la ecuación (2).

Se estimó el valor de  $F$  teórico para las tres relaciones de  $R/r$  a partir del valor típico de la tensión superficial  $P$  del agua sin corrección, que se aproxima a un valor de  $77,50 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  [10] y a partir de los datos dimensionales del anillo, la densidad del agua y del aire, se

utilizó la ecuación (2) para determinar la corrección. Para contrastar los valores obtenidos, se realizó una interpolación lineal entre los resultados mostrados en la figura 2 alrededor del valor de interés y se obtuvieron los factores de corrección específicos. Los resultados se muestran en el CUADRO III.



**Figura 2:** Factor de corrección  $F$  como función de  $R/r$  y en términos de la tensión máxima entre la diferencia de las densidades de los medios para un anillo de  $R \approx 0,97 \text{ cm}$ .

**CUADRO III:** Resultados de la aplicación de la ecuación (2) para anillos con  $R$  de aproximadamente  $0,97 \text{ cm}$  y una indicación de tensión de  $77,50 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , además del contraste contra los resultados de la interpolación de los datos de [7]. Se muestra también el resultado aplicado para el anillo del Lacomet (con  $R/r$  igual a  $49,87$ ) en la última fila.

$R/r$	$R^3/V$	$F_{\text{teórico}}$	$F_{\text{interp}}$	% dif
30	1,27	0,866	0,861	0,507
40	1,01	0,909	0,909	0,007
60	1,13	0,944	0,943	0,078
49,87	-	0,930		-

Se evidencia en los resultados del CUADRO III que los porcentajes de diferencia entre la aplicación directa de la ecuación (2) y los resultados reportados por [7] adaptados a anillos de  $R$  aproximadamente de  $0,97 \text{ cm}$ ,

son menores al 1 %, lo que infiere que ambos modelos son aplicables para el ámbito en cuestión sin diferencia significativa. Además, el valor de  $F$  obtenido para el anillo del Lacomet por la aplicación de la ecuación (2) tuvo una magnitud intermedia entre lo modelado para anillos con mayor y menor relación de radios, lo que respalda el uso de la ecuación experimental en el ámbito cercano a indicaciones cercanas a  $77,50 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ .

La comprobación del uso de la corrección se realizó posteriormente [13] mediante una prueba a través de la medición de la tensión superficial de agua de grifo, de la que se obtuvo una indicación de tensión promedio de  $76,95 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ . La aplicación de la ecuación (2) para el anillo del Lacomet determina un factor de corrección de 0,930 (unidad 1), que estima una tensión corregida de  $71,54 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  con una desviación estándar de  $0,10 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  a temperatura ambiente. El valor típico reportado de tensión superficial para el agua ordinaria [14] a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  es de  $(71,98 \pm 0,36) \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , lo que conlleva a una diferencia porcentual - 0,6 % que resulta aceptable tomando en cuenta la cantidad de supuestos para asumir la hipótesis de equivalencia en la comparación.

## 5. Conclusiones

Se determinan las condiciones iniciales para las mediciones de la tensión superficial de líquidos con el equipo adquirido por el Lacomet, tomando en cuenta que los parámetros dimensionales descritos por el fabricante del anillo pueden ser utilizados inicialmente y a sabiendas de que se debe implementar alguna metodología para caracterizar adecuadamente las dimensiones del anillo sin que se ponga en riesgo la integridad de las mismas.

La aproximación de los resultados de  $F$ , teóricos e interpolados, parece ser razonable para su uso. La verificación deberá realizarse

cuando el equipo este a punto y se puedan ensayar líquidos de densidad conocida y de tensión superficial ampliamente caracterizada.

Los resultados experimentales son fundamentales para establecer un procedimiento controlado que incluya el modelo matemático idóneo y el presupuesto de incertidumbre para la determinación de la tensión superficial de líquidos y su aplicación metrológica.

Es de interés particular que este reporte establezca una línea base para la continuidad de los trabajos de puesta a punto del método orientados a i) la validación del método de medición de la tensión superficial de líquidos para usos metrológicos, ii) el establecimiento de un procedimiento y hoja de cálculos, y iii) la realización de un estudio de la tensión superficial de patrones líquidos utilizados como patrones en el Lacomet.

## 6. Referencias

- [1] J. Díaz y B. L. O., «Tensión Superficial, Importancia de las mediciones en la Metrología de Densidad con un Valor de Incertidumbre Aceptable,» de Simposio de Metrología 2008, Santiago de Querétaro, México, 2008.
- [2] S. V. Gupta, Practical Density Measurement and Hydrometry, Wiltshire, UK: IOP Publishing Ltd, 2002.
- [3] J. B. Patterson y E. C. Morris, «Measurement of Absolute Water Density, 1 °C to 40 °C,» Metrologia, pp. 277-288, 1994.
- [4] Schott-Geräte GmbH, «An Introduction,» de Theory and Praxis of Capillary Viscometry, Mainz, Germany, pp. 1-40.
- [5] CSC Scientific Company, DuNouy Tensiometer, Fairfax, VA: CSC Scientific Company, Inc., 2012.
- [6] H. H. Zuidema y G. W. Waters, «Ring Method for the Determination of Interfacial Tension,» Industrial and Engineering Chemistry, pp. 312-313, 1941.
- [7] C. Huh y S. G. Mason, «A rigorous theory of ring tensiometry,» Colloid & polymer Science, pp. 566-580, 1975.
- [8] W. D. Harkins y H. F. Jordan, «A method for the determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring,» J. Am. Chem. Soc., pp. 1751-1772, 1930.
- [9] F. Sequeira, «Introducción a la medición de la tensión superficial LACOMET-MF-MEM-58-2020,» San José, Costa Rica, 2020.
- [10] CSC Scientific Company. Inc., «Precision Tensiometer: First time user guide,» CSC Scientific Company. Inc., Fairfax, VA.
- [11] R. Laurent, «EIT-516-2020,» Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR, San José, Costa Rica, 2020.
- [12] A. Servín, L. O. Becerra, A. Daued y e. al, «Estudio de la temperatura, humedad relativa y densidad como variables de influencia par la medición de la tensión superficial de pentadecano,» de Simposio de Metrología, Querétaro, 2016.
- [13] F. Sequeira, «FSC-DE-03 folio 33,» San José, Costa Rica, 2023.
- [14] IAPWS, «Revised Released on Surface Tension of Ordinary Water Substance,» The International Association for the Properties of Water and Steam, Moscow, 2014.