

**MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN TUBERÍAS MEDIANTE SPECKLE
DINÁMICO**

**ADRIANA FERNANDA BURBANO MOLANO
JULIO CÉSAR RODRÍGUEZ MOSQUERA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2013**

**MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN TUBERÍAS MEDIANTE SPECKLE
DINÁMICO**

**ADRIANA FERNANDA BURBANO MOLANO
JULIO CÉSAR RODRÍGUEZ MOSQUERA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Físico**

**Director
ING. MARIO MILVER PATIÑO VELASCO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2013**

Nota de aceptación:

Aprobado

Director

Mario Milver Patiño V.

M.Sc Mario Milver Patiño Velasco

Jurado

Luis Fernando Echeverri

M.Sc Luis Fernando Echeverri

Jurado

Ana María Guzmán P.

M.Sc Ana María Guzmán

Fecha de Sustentación: Popayán, 28 de junio de 2013.

Dedicamos el presente trabajo a nuestra familia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de nuestro aprendizaje. A nuestros amigos, porque hicieron parte de este proceso, nos brindaron alegrías y llenaron de fortaleza frente a cada dificultad. A cada uno de los profesores que hicieron posible este proyecto compartiendo su tiempo, recomendaciones y palabras de aliento. Y finalmente a nuestro director, por ofrecernos sus valiosos consejos y amistad.

Adriana Fernanda Burbano

Julio César Rodríguez

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MEDICIÓN DE FLUJO.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Sensores de presión diferencial.....	3
1.2.1 Placas de orificio, medidores de Venturi y toberas de flujo.....	4
1.2.2 Tubo de Pitot.....	7
1.3 Medidores electromagnéticos	8
1.4 Medidores de turbina	9
1.5 Medidores de vórtice.....	9
1.6 Medidores de área variable	10
1.6.1 Rotámetro	10
1.7 Medidores de desplazamiento positivo.....	11
1.8 Medidores ultrasónicos.....	11
1.9 Medidores másicos	13
1.10 Anemómetros	13
1.10.1 Anemómetros mecánicos	13
1.10.2 Anemómetros térmicos	14
1.10.3 Anemómetros láser-Doppler	15
1.11 Medidor de disco	16
1.12 Relación entre flujo y velocidad.....	19
REFERENCIAS.....	20
2. FUNDAMENTOS DE SPECKLE.....	21
2.1 Efecto speckle	21
2.1.2 Análisis estadístico de los patrones speckle.....	22

2.1.3	Tamaño de grano en patrones de speckle.....	27
2.2	Speckle dinámico	28
2.2.1	Descriptores de la actividad de patrones de speckle dinámico.....	29
	REFERENCIAS.....	32
3.	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	34
3.1	Diseño y configuración experimental	34
3.1.1	Sistema óptico.....	34
3.1.1.1	Sistema de iluminación.....	34
3.1.1.2	Sensor de imagen.....	35
3.1.1.3	Adquisición de las imágenes	35
3.1.2	Sistema de circulación de flujo	36
3.2	Análisis de los patrones de speckle.....	40
3.3	Validación del método	46
	REFERENCIAS.....	46
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
4.1	Calibración del Fluxómetro de referencia	47
4.2	Aplicación de los algoritmos de análisis	48
4.2.1	Contraste.....	48
4.2.2	Correlación	53
4.2.3	Análisis de rango de movimiento.....	54
	CONCLUSIONES.....	63
	RECOMENDACIONES FUTURAS	64

INTRODUCCIÓN

En una economía que está buscando establecer relaciones comerciales fluidas con el exterior y que deben ser altamente competitivas, es necesario que cuente con una estructura productiva que no puede continuar basándose en las ventajas comparativas que en el pasado la dotaron de fuerza. En la economía global, el sector productivo sólo puede sobrevivir mediante calidad, novedad y una diversidad de productos y servicios que únicamente pueden ser generados a través de la innovación y del continuo cambio tecnológico.

Desde la antigüedad, la óptica ha estado presente en los elementos de uso cotidiano, como en los dispositivos de instrumentación científica y de la ingeniería. La aparición del láser y el desarrollo experimentado por la electrónica, la informática y las telecomunicaciones han permitido el progreso y la creación de nuevas técnicas ópticas que tienen presencia en diversas áreas de la era tecnológica actual. La creciente demanda de la industria por obtener técnicas de medición fiables, precisas, rápidas, no destructivas y sin contacto con la muestra ha impulsado el desarrollo de nuevas aplicaciones en la metrología óptica.

En años recientes, los sistemas de ciencia y tecnología de Colombia no han podido acelerar su dinámica, para ir a la par con el crecimiento de una economía basada en el conocimiento. En este proceso de transición, el país necesita alternativas que lo conduzcan hacia el desarrollo de herramientas e instrumentos que permitan evolucionar hacia servicios y productos más integrales, que respalden el crecimiento y la innovación tecnológica en el sector productivo [1].

Con el objetivo de contribuir a la solución de un problema nacional, utilizando tecnología propia, el presente trabajo propone una nueva metodología de análisis de flujos utilizando speckle dinámico en tubos opacos, con el fin de medir la velocidad de los fluidos que pasan en su interior.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la técnica de speckle dinámico a la medición de fluidos, en este caso agua, que circulan por el interior de una tubería opaca. El informe está estructurado de la siguiente manera:

El capítulo 1, denominado *Medición de flujo*, presenta una visión general de los principios físicos que se utilizan para medir velocidad de fluidos y las características de algunos de los sensores de flujo más utilizados.

El capítulo 2, llamado *Fundamentos de speckle*, presenta los principios físicos y matemáticos utilizados para la descripción del fenómeno speckle y su tratamiento estadístico. También se describen los principales métodos utilizados para extraer la información que se almacena en los patrones de speckle.

El capítulo 3, denominado *montaje experimental*, describe el sistema óptico implementado, las diferentes configuraciones de flujo empleadas para realizar las medidas y los algoritmos implementados. También presenta el protocolo desarrollado para el adecuado registro de las imágenes de speckle que almacenan la información del fluido.

El capítulo 4, llamado *Resultados y análisis de resultados*, presenta la información adquirida del análisis de las imágenes de video que contienen los patrones de speckle y se examinan algunos de los descriptores utilizados que permiten correlacionar la velocidad del fluido con la actividad que se presenta en el specklegrama y se concluye acerca de la viabilidad de la técnica.

Este trabajo de investigación se plantea como un trabajo pionero que busca desarrollar una herramienta que determine la velocidad de fluidos en tubos opacos, haciendo uso de la técnica de speckle dinámico.

1. MEDICIÓN DE FLUJO

En esta capítulo se ofrece una visión general de las técnicas de medida de flujo y las características de algunos de los sensores más utilizados. Se presenta una breve descripción de los principios de funcionamiento y se resaltan sus ventajas y desventajas.

1.1 Introducción

La medición en fluidos resulta de suma importancia en la mayor parte de los procesos industriales, así como en operaciones realizadas en laboratorios y plantas piloto, donde se requiera medir las propiedades del flujo y varios de sus parámetros, como presión, velocidad y descarga. Para el control de procesos industriales es esencial conocer la cantidad de flujo que entra y sale del proceso. El movimiento de fluidos en las industrias del petróleo, agrícola, los productos químicos, de abastecimiento de agua y aguas residuales requieren grandes inversiones anuales. La incertidumbre presente en la medición de estos flujos puede tener un impacto significativo en materiales y costos [1].

Las mediciones de estos parámetros no son exclusivas de la ingeniería. En campos como la medicina es importante monitorear las funciones de los sistemas del cuerpo humano, para entender su funcionamiento y para controlar las dosis de fluidos, como gases y líquidos, que se suministran en algunos de sus procedimientos.

Se han desarrollado diversos instrumentos para medir parámetros de flujo, estos varían notablemente en sus niveles de sofisticación, tamaño, costo, precisión, versatilidad, capacidad y principio operativo. A continuación se presentan las características y limitaciones de algunos de los sensores de flujo más utilizados.

1.2 Sensores de presión diferencial

La detección de la caída de presión a través de una restricción, es sin duda el método más utilizado de medición de flujo industrial. La disminución de la presión que resulta de una corriente que fluye a través de una restricción es proporcional al cuadrado de su velocidad y a su densidad; por lo tanto, si la densidad es constante, la caída de presión puede ser interpretada como una medida del flujo [2] y a partir de ese valor obtener la velocidad.

Los medidores de presión diferencial (d/p) tienen la ventaja de ser el tipo medida más familiar. Son ampliamente utilizados para medir el flujo de gases y líquidos, incluyendo

líquidos viscosos y corrosivos. Sus ventajas incluyen la falta de partes móviles y una idoneidad para prácticamente todas las velocidades de flujo en una amplia variedad de tubos y tuberías.

Todos los medidores de presión diferencial exhiben una relación cuadrática entre la carga generada y la velocidad de flujo, lo que limita gravemente su rango de operación. La desventaja de los medidores de flujo tipo d/p es que, además del elemento sensor, se necesitan otros componentes para realizar la medición [3].

1.2.1 Placas de orificio, medidores de Venturi y toberas de flujo

Si se considera un flujo estacionario incomprensible, que circula por una tubería horizontal de diámetro D y que posteriormente se restringe a una nueva área de diámetro d , como se muestra en la *figura 1.1.*, se puede describir su dinámica través de las ecuaciones de equilibrio de masa y de Bernoulli, entre una posición antes de la restricción (punto 1) y la posición donde ocurre la restricción (punto 2), de la siguiente manera:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \rightarrow V_1 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right) V_2 = \left(\frac{d}{D}\right)^2 V_2 \quad (1.1)$$

$$(z_1 = z_2) \frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad (1.2)$$

Cuando se combinan las ecuaciones 1.1 y 1.2 y se resuelven para la velocidad V_2 se obtiene:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma(1 - (d/D)^4)}} \quad (1.3)$$

Después de que se conoce V_2 , la razón de flujo se puede determinar a partir de $Q = A_2 V_2 = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) V_2$

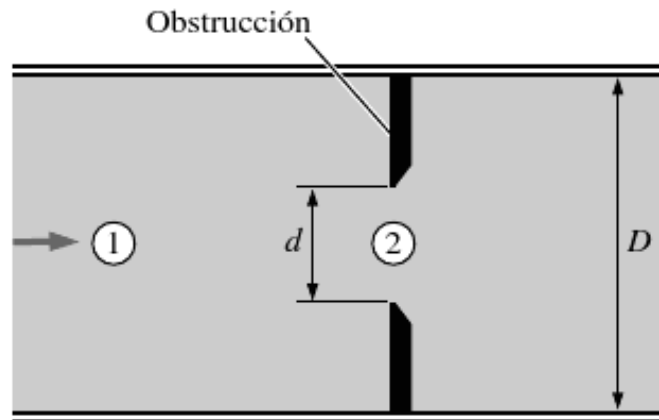


Figura 1.1 Flujo a través de una restricción en una tubería¹

La velocidad en la ecuación 1.3 se obtiene cuando se supone ausencia de pérdidas y por lo tanto, es la velocidad máxima que puede ocurrir en el sitio de la restricción. Sin embargo, algunas pérdidas de presión son inevitables debido a los efectos de fricción, por lo que la velocidad medida será ligeramente menor. Además, la corriente del fluido continuará contraída al pasar la obstrucción, y el área de vena contracta será menor que el área de flujo de la obstrucción. Ambas pérdidas se puede explicar al incorporar un factor de corrección, llamado coeficiente de descarga C_d , cuyo valor se determina experimentalmente.

La razón de flujo para el flujómetro de obstrucción se puede expresar como:

$$Q = A_0 C_d \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (1.4)$$

donde $A_0 = A_2 = \pi d^2/4$ es el área transversal del agujero y $\beta = d/D$ es la razón del diámetro al agujero al diámetro de la tubería. El valor C_d depende tanto de β como del número de Reynolds $Re = V_1 D / \nu$, y las gráficas y correlaciones de ajuste de curvas para C_d están disponibles para varios tipos de medidores de obstrucción.

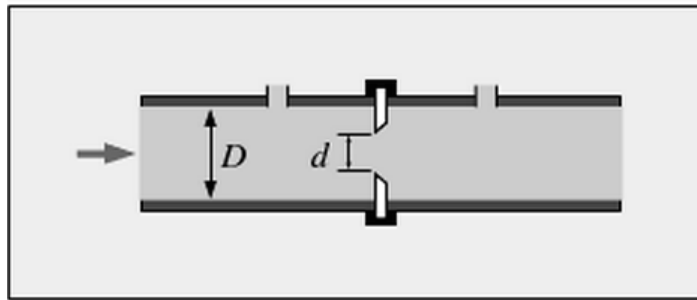
De los numerosos tipos de medidores de obstrucción disponibles, los más usados son las placas de orificio, las toberas de flujo y los medidores Venturi (figura 1.2). Los datos determinados experimentalmente para coeficientes de descarga se expresan como:

Placas de orificio:
$$C_d = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{91.71\beta^{2.5}}{Re^{0.75}} \quad (1.5)$$

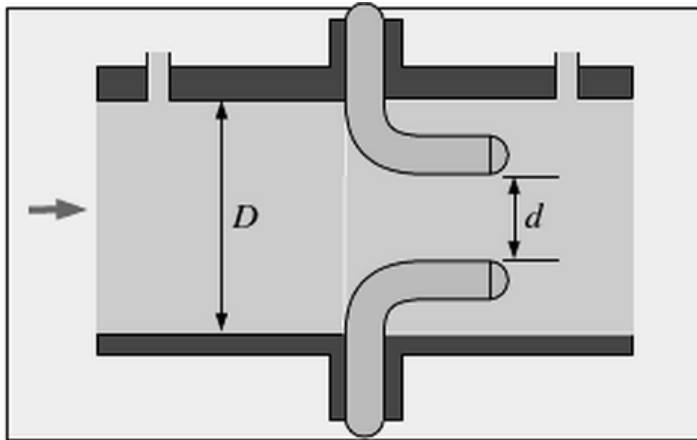
¹ Yunus, C., Cimbalá, J. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. Mc Graw Hill. España (2006).

Toberas de flujo

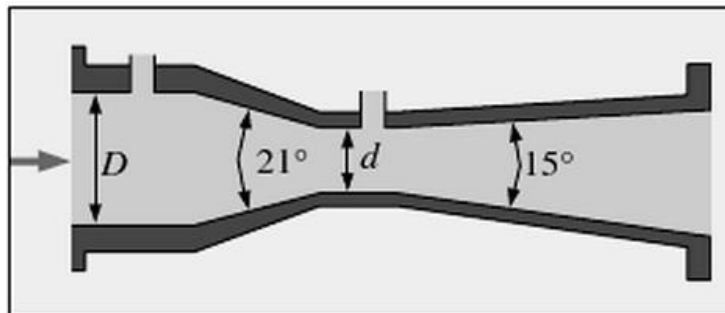
$$C_d = 0.9975 - \frac{6.53\beta^{0.5}}{Re^{0.5}} \quad (1.6)$$



(a)



(b)



(c)

Figura 1.2 Tipos comunes de medidores de obstrucción. a) Placa de orificio, b) tobera de flujo, c) medidor Venturi¹

¹ Yunus, C., Cimbalá, J. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. Mc Graw Hill. España (2006).

Estas relaciones son válidas para $0.25 < \beta < 0.75$ y $10^4 < Re < 10^7$. Los valores precisos de C_d dependen del diseño particular del flujómetro de obstrucción y por lo tanto se deben consultar los datos del fabricante cuando estén disponibles. Para flujos con números de Reynolds altos ($Re > 30000$), el valor de C_d se puede tomar como 0.69 para toberas de flujo y 0.61 para placas de orificio. Debido al diseño de los medidores Venturi, los coeficientes de descarga de estos son muy altos y varían entre 0.95 y 0.99 para la mayoría de los fluidos.

La placa de orificio tiene un diseño más simple y ocupa un espacio mínimo, porque consiste de una placa con un agujero en el medio, pero existen variaciones considerables en su diseño. Algunas placas de orificio tienen bordes agudos, mientras que otras son biseladas o redondeadas. El cambio repentino el área de flujo en las placas de orificio provoca considerables giros y por lo tanto pérdidas de carga significativas o pérdidas de presión permanentes, como se muestra en la *figura 1.2*. En las toberas de flujo, la placa se sustituye por una tobera y por lo tanto, el flujo en la tobera es continuo. Como resultado, la vena contracta prácticamente se elimina y la pérdida de carga es pequeña. Sin embargo, las toberas de flujo son más caras que las placas de orificio.

El medidor Venturi es el flujómetro más preciso en este grupo, pero también el más caro. Su contracción y expansión graduales evitan la separación del flujo y los remolinos y sólo tiene pérdidas de fricción en las superficies de la pared interior. Los medidores Venturi causan pérdidas de carga muy bajas y por lo tanto se deben utilizar en aplicaciones donde no se pueden permitir grandes caídas de presión. La pérdida de carga irreversible para los medidores Venturi, debida a la fricción, sólo es de alrededor del 10 por ciento.

1.2.2 Tubo de Pitot

Cuando un fluido en movimiento es obligado a frenarse abruptamente debido a su encuentro con un objeto estacionario, se genera una presión mayor que la presión de la corriente del fluido. La magnitud de esta presión incrementada se relaciona con la velocidad del fluido en movimiento. El tubo pitot es un tubo hueco de tal forma que los extremos abiertos apuntan directamente a la corriente del fluido. El diferencial entre la presión total en el extremo abierto y la presión de la tubería estática es una indicación del flujo.

Para la medición de grandes corrientes, los tubos pitot proporcionan un sistema de medición de muy bajo costo, con una pérdida de presión insignificante. Su principal limitación es que miden la velocidad que fluye en un solo punto y por lo tanto, incluso después de la calibración, existirá error con cada cambio en el perfil de velocidad [3]

1.3 Medidores electromagnéticos

Los caudalímetros magnéticos funcionan de acuerdo con la ley de Faraday, por lo que estos medidores evalúan la velocidad de líquidos eléctricamente conductores. La principal ventaja de los caudalímetros magnéticos es que éste es un dispositivo no intrusivo, debido a esta característica, no hay pérdida de presión y no experimentan ningún desgaste de sus componentes. Otras ventajas incluyen su compatibilidad química prácticamente con todos los líquidos, indiferentemente a la viscosidad, la presión, la temperatura y las variaciones de densidad. También, su capacidad para proporcionar salidas analógicas lineales, para medir los flujos bidireccionales, son otras ventajas; además, está disponible en una amplia gama de tamaños [2].

Su principal limitación es que sólo se pueden utilizar en líquidos eléctricamente conductores. Otra desventaja es su alto precio de compra y el costo de mantenimiento del campo magnético.

Los medidores de flujo electromagnéticos están compuestos de bobinas magnéticas y electrodos que rodean al tubo (*figura 1.3*). Las bobinas están aisladas del fluido mientras que los electrodos hacen contacto con él. En el fluido se disuelven suficientes electrolitos de manera que sea capaz de conducir una corriente eléctrica. Cuando pasa a través del campo magnético generado por las bobinas, el líquido creará un voltaje inducido proporcional al flujo. Se han utilizado medidores de flujo electromagnético en muchas aplicaciones, entre ellas mediciones de flujo de sangre y agua de mar; se recomienda a menudo para aplicaciones con líquidos acuosos y lodos corrosivos [4].

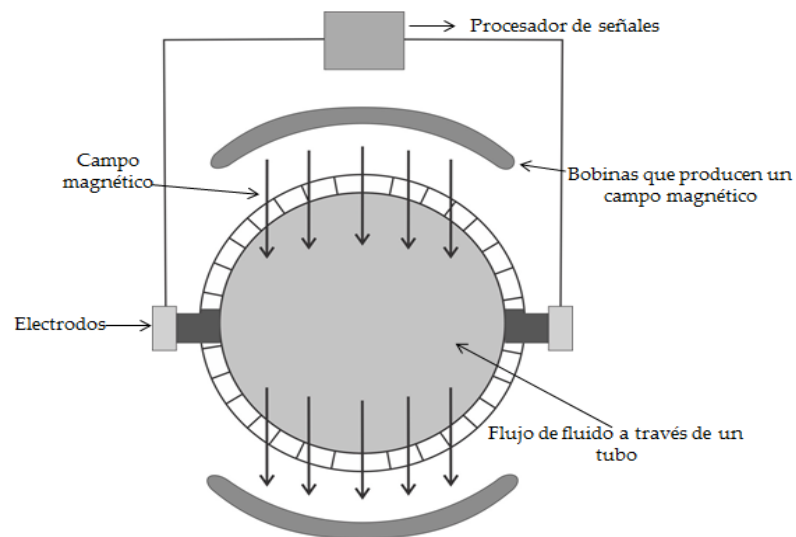


Figura 1.3 Medidor de flujo electromagnético.¹

1.4 Medidores de turbina

En los medidores de turbina se genera una salida cuando el fluido hace que el rotor de una turbina gire a una velocidad, que es dependiente del flujo volumétrico. Se pueden utilizar en líquidos y gases y son adecuados tanto para la medición de tasas muy bajas como muy altas de flujo. Los medidores de turbina se pueden usar prácticamente a cualquier presión y para aplicaciones que implican temperaturas extremadamente altas y bajas. Son fáciles de instalar y en relación con el diámetro de la tubería son pequeños en tamaño y peso. El medidor proporciona una velocidad de respuesta muy rápida y es adecuado para aplicaciones higiénicas. [2]

Sus limitaciones principales son su alto costo, incompatibilidad con líquidos viscosos o sucios y la posibilidad de sufrir daños por exceso de velocidad.

1.5 Medidores de vórtice

Este tipo de sensores están conformados por un cuerpo acuñado de bordes agudos, colocado en el flujo, que sirve para generar vórtices y un detector colocado a una corta distancia, corriente abajo en la superficie interior del revestimiento, para medir la frecuencia de derrame. El detector puede ser un sensor electrónico, ultrasónico o de fibra óptica, que monitorea los cambios en el patrón de vórtice y transmite una señal de

¹Lipták, B. Instrument Engineers' Handbook. Volumen I. Process Measurement and analysis. 4ª edición. CRC Press (2003).

salida pulsátil. Un microprocesador usa la información de la frecuencia para calcular y desplegar la velocidad del flujo o la razón de flujo [3].

Sus ventajas incluyen una buena precisión y repetitividad, alto rango de operación y bajo costo de mantenimiento.

Dentro de sus desventajas, estos caudalímetros no se pueden utilizar para medir el flujo de fluidos viscosos o sucios. También están limitados a tamaños menores de 12 pulgadas (300mm), debido a que la frecuencia de oscilación del fluido disminuye al aumentar el tamaño de línea. La otra limitación es que no se forman vórtices a números de Reynolds por debajo de 10.000, por lo tanto, este contador no se puede utilizar en aplicaciones de bajo número de Reynolds [2].

1.6 Medidores de área variable

Estos medidores son ampliamente utilizados para aplicaciones en las que se va a medir pequeñas velocidades de flujo o donde se requiera una indicación local de caudal. Los medidores de área variable están disponibles en cristal y estructuras de tubo metálico. Sus ventajas son el bajo costo, baja pérdida de carga, indicación de flujo directo y la capacidad de detectar las tasas de flujo muy bajas de gases o líquidos, incluyendo líquidos viscosos [4].

Las limitaciones de todos los medidores de área variable incluyen la necesidad de un montaje vertical y que sólo están disponibles en tamaños pequeños.

1.6.1 Rotámetro

El rotámetro se compone de un tubo ahusado en el cual el flujo está dirigido verticalmente hacia arriba (*figura 1.4*) Un flotador sube o baja, en respuesta a la velocidad de flujo, hasta que alcanza una posición en la que la fuerza de arrastre en el flotador se equilibra con su peso sumergido. La calibración consiste en correlacionar la elevación vertical con la descarga. Con un diseño apropiado, se puede hacer que la posición sea linealmente proporcional a la descarga, o si se desea, se puede formular otra relación, tal como una posición logarítmicamente proporcional a la descarga. La pérdida de carga depende de la pérdida por fricción en el tubo más la pérdida a través del elemento flotador. El rotámetro no es tan preciso como los medidores de presión diferencial. Por lo general, su precisión oscila dentro del 5% del rango de escala completa [2].

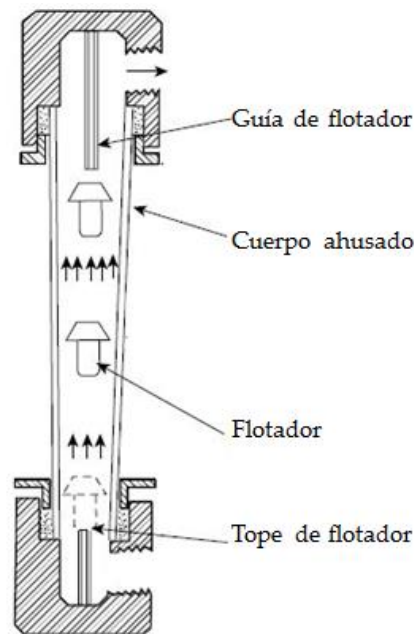


Figura 1.4 Rotámetro¹

1.7 Medidores de desplazamiento positivo

Los fluidos que ingresan a un medidor de desplazamiento positivo llenan una cámara que se mueve del lado de entrada al de salida del instrumento. El medidor registra o indica el volumen acumulado del fluido que ha pasado a través de él. Las cámaras adoptan muchas formas y es frecuente que sean propiedad de un fabricante dado [1].

Los usos comunes de los medidores de desplazamiento positivo son la distribución de aguas a los hogares en los sistemas municipales, medida del gas natural que se entrega a los consumidores y la gasolina que se vende en las estaciones de servicio.

1.8 Medidores ultrasónicos

Una ventaja grande de un medidor de flujo ultrasónico es que no es invasivo. Se adjunta un generador ultrasónico al exterior del tubo y se trasmite una señal de alta frecuencia a través de la pared y de la corriente de flujo. El tiempo que le toma a la señal atravesar la tubería, depende de la velocidad del fluido que circula por él. [2]

¹ Kuphaldt, T. Lessons In Industrial Instrumentation. Creative Commons Attribution, Usa (2009).

Existen dos tipos de medidores de flujo ultrasónico de acuerdo al principio de funcionamiento: tiempo de tránsito y efecto Doppler. El primero utiliza transmisores/receptores ultrasónicos colocados transversalmente a una trayectoria de flujo (*figura 1.5*). Las diferencias medidas en los tiempos de recorrido (o en las frecuencias) son directamente proporcionales a la velocidad promedio y por consiguiente, a la descarga. Los medidores de tiempo de tránsito funcionan mejor con fluidos limpios, porque las partículas contenidas en los fluidos sucios afectan las lecturas de tiempo y la intensidad de la señal que llega a los detectores. El segundo tipo está basado en el efecto Doppler, donde las ondas son transmitidas al interior del campo de flujo y posteriormente son dispersadas por partículas o contaminantes introducidos. El cambio en la frecuencia registrado entre la onda emitida y la detectada depende de la velocidad de descarga. Los detectores tipo Doppler se utilizan preferentemente para fluidos sucios, como el fango, que inhiben la transmisión de la señal ultrasónica. La onda de presión ultrasónica no atraviesa por completo la pared opuesta de la tubería. En vez de ello, se refleja en las partículas que hay en el fluido y regresa al receptor [4].

Al igual que el medidor de flujo electromagnético, los medidores de flujo acústicos son no intrusivos y se utilizan tanto en sistemas de tuberías como en sistemas de flujo de superficie libre.

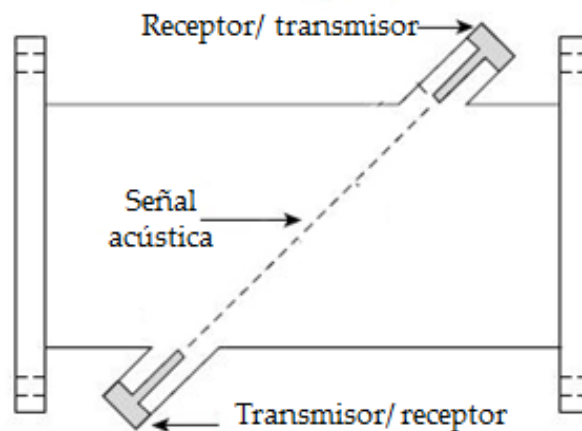


Figura 1.5 Medidor de flujo ultrasónico¹

¹ Doebelin, E. Sistemas de Medición e Instrumentación. Mc Graw Hill. Quinta edición. 2005

1.9 Medidores máscicos

La medición del flujo de masa se puede obtener como el producto del flujo volumétrico y la densidad, o como una medición directa del caudal máscico del gas, líquido o sólido que fluyen en el proceso.

La masa de líquidos y gases puede ser detectada directamente por dispositivos que miden el momento angular o indirectamente a través de la medición de flujo volumétrico y la densidad. Estos métodos tradicionales, en los últimos años, han sido reemplazados por los caudalímetros máscicos de Coriolis. Estos instrumentos funcionan aplicando una fuerza de vibración a un tubo curvado a través del cual pasa el fluido. El efecto Coriolis crea una fuerza en el tubo perpendicular a ambas direcciones: la de vibración y la dirección de la corriente. Es esta fuerza la que se mide para obtener el caudal máscico.

Los medidores de Coriolis pueden operar a velocidades de flujo de proceso de 0,061 a 6,1m/seg, manteniendo una alta precisión. Algunas limitaciones son sus tamaños relativamente pequeños (hasta de 6 pulgadas), la sensibilidad de la vibración y la incapacidad para manejar fluidos de procesos de alta temperatura (más de 205 °C [400°F]) [2].

Los caudalímetros máscicos Coriolis son utilizados en la medición de los flujos de combustible y en todas las mediciones en las que la masa es de interés.

1.10 Anemómetros

Los anemómetros se pueden dividir en 3 tipos: anemómetros mecánicos, de los cuales los más representativos son los anemómetros de copa, anemómetros térmicos y anemómetros láser Doppler [2].

1.10.1 Anemómetros mecánicos

Anemómetro de copa o hélice

Los anemómetros de copa o hélice se emplean para medir la velocidad de gases o líquidos. Son relativamente grandes y por consiguiente, la medición se destina espacialmente a áreas relativamente grandes. Estos anemómetros se utilizan en muchas aplicaciones en las que no se requiere una precisión extrema. Los anemómetros de copa siempre giran en un sentido y por lo tanto no pueden proporcionar la dirección del flujo. Por otra parte, el anemómetro de hélice invierte la rotación cuando el flujo se invierte; sin embargo, en contraste con los anemómetros de copa, se deben alinear con la dirección del flujo. Un anemómetro de hélice y ducto que sirve para medir velocidades

de aire se muestra en la *figura 1.6*. También se emplean hélices sin ducto, un ejemplo es la veleta (*figura 1.7*). Las hélices también se colocan en el interior de tuberías y se utilizan como medidores de flujo. En todos estos dispositivos se transforma la velocidad de rotación en valores de frecuencia, los cuales se correlacionan con la velocidad a través de una prueba de calibración.

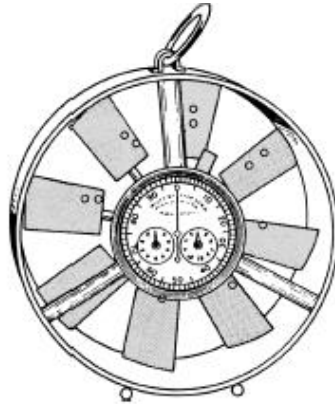


Figura 1.6 Anemómetro de hélice y ducto.¹

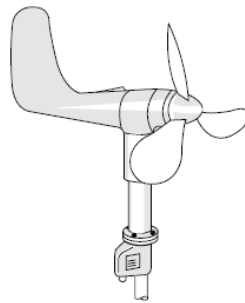


Figura 1.7 Anemómetro de veleta.¹

1.10.2 Anemómetros térmicos

Se introdujeron a finales de la década de los cincuenta y han sido de uso común desde entonces en instalaciones y laboratorios de investigación de fluidos. Los anemómetros térmicos incluyen un sensor que se calienta eléctricamente y utilizan un efecto térmico para medir la velocidad de flujo. También poseen sensores extremadamente pequeños y

¹ Lipták, B. Instrument Engineers' Handbook. Volumen I. Process Measurement and analysis. 4ª edición. CRC Press (2003).

se pueden usar para medir la velocidad instantánea en cualquier punto de flujo sin perturbarlo considerablemente.

Un anemómetro térmico se llama anemómetro de hilo caliente, si el elemento sensible es un alambre y anemómetro de película caliente, si el sensor es una película metálica montada sobre un soporte cerámico relativamente grueso. El anemómetro de hilo caliente se caracteriza por su alambre sensor muy pequeño, de unas pocas micras de diámetro y longitud del orden de los milímetros. El sensor está fabricado de tungsteno, platino o platino-iridio, el cual está aislado y montado sobre soportes como se muestra en la *figura 1.8*. Este sensor es muy frágil debido a su tamaño pequeño y con facilidad puede romperse si el líquido o gas contiene cantidades excesivas de contaminantes o presenta velocidades muy altas. En estos casos se deben usar las sondas de película caliente, debido a que el sensor es más grande, tiene una respuesta a la frecuencia considerablemente más baja e interfiere más con el flujo.

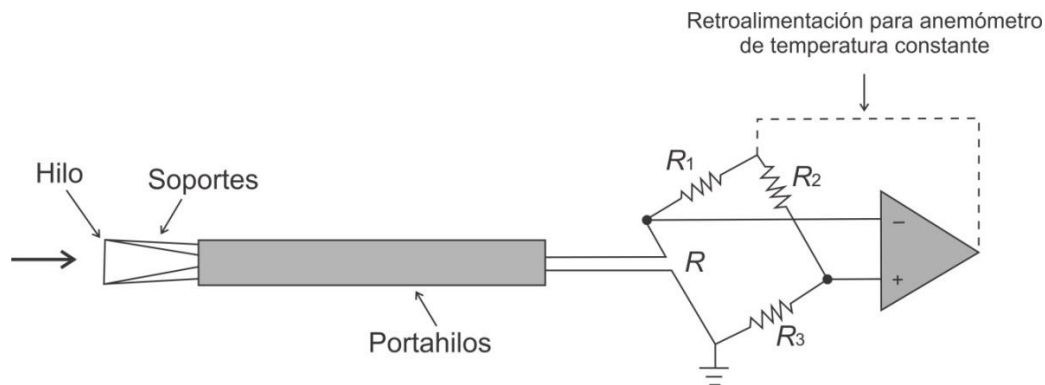


Figura 1.8 Anemómetro de hilo caliente¹

El principio operativo es el siguiente: el sensor se calienta eléctricamente a una temperatura específica, por lo general alrededor de 200°C. El sensor tiende a enfriarse, pero los controles electrónicos mantienen su temperatura constante. Mientras mayor sea la velocidad de flujo, mayor será la transferencia de calor desde el sensor y más grande el voltaje que se necesite aplicarle para mantenerlo a una temperatura constante.

1.10.3 Anemómetros láser-Doppler

Es un dispositivo que se usa cuando no se desea tener la sonda sumergida en el flujo. El velocímetro laser Doppler (LDV, por sus siglas en inglés) más común es el tipo de doble rayo, mostrado en la *figura 1.9*. El fotodetector mide la frecuencia de la luz dispersada y la convierte en una señal eléctrica. En la intersección de los rayos se forma un patrón de

¹ Mott, R. Mecánica de Fluidos aplicada. Pearson Education. 6ª edición. Mexico, (2006).

frangas con una separación Δx entre ellos. La luz dispersada por las partículas que pasan a través del patrón de frangas es modulada con una frecuencia f , la cual es directamente proporcional a la componente de velocidad u normal a las frangas: [4]

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda f}{2 \sin(\theta/2)} \quad 1.1$$

en la cual λ es la longitud de onda del láser y θ es el ángulo de incidencia del rayo. La detección de la inversión del flujo es posible si se utiliza un patrón de frangas móvil [6].

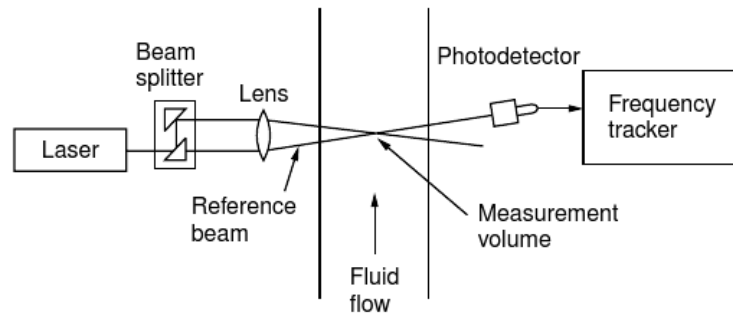


Figura 1.9 Anemómetro láser-Doppler.¹

Con un LDV se pueden medir velocidades tanto en líquidos como en gases. En general, un LDV puede medir velocidades que oscilan entre 2mm/s hasta el intervalo supersónico. La respuesta a la frecuencia se amplía a 30kHz, lo que permite medir componentes de velocidad turbulenta. En contraste con el anemómetro térmico, el LDV no requiere calibración y mide la inversión del flujo con relativa facilidad. El costo inicial del LDV es elevado y se requieren varios instrumentos electrónicos para procesar la señal de salida. Comúnmente se utiliza un procesador de señal tipo contador. Otra desventaja es que es necesario que el fluido contenga una cantidad suficiente de pequeñas partículas, llamadas semillas o partículas sembradas, para que se pueda dispersar una cantidad suficiente de luz.

1.11 Medidor de disco

La *figura 1.10* muestra un medidor de disco, el cual consiste en un disco sujeto a un soporte sumergido en el flujo. El soporte está conectado a un brazo de palanca o alternativamente, tiene un medidor de deformación adherido a su superficie. El arrastre que provoca el fluido en el disco hace que el soporte se flexione un poco y la fuerza de

¹ Kothandaraman, C.P, Rudramoorthy, R. Fluid Mechanics and Machinery. New Age International Publishers. 2ª edición. New Delhi, (2007).

arrastre registrada se relaciona con la descarga. El ensamble debe ser lo suficientemente rígido, de modo que el arrastre pueda ser medio sin movimiento o rotación del disco, de lo contrario se alterarían las características del arrastre. Una ventaja de este dispositivo es que es posible registrar la inversión del flujo, midiendo el sentido de la fuerza de retardo; por consiguiente, se puede usar como un medidor de flujo bidireccional. Los medidores de flujo son bastante resistentes y se utilizan para medir descargas en fluidos cargados de sedimentos [6].

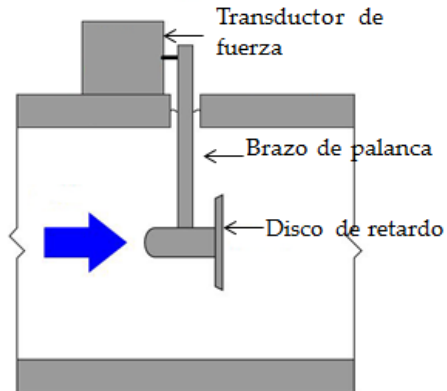


Figura 1.10 Medidor de disco¹

A continuación, se muestra una tabla con el resumen de algunas características de los medidores de caudal.

¹ Lipták, B. Instrument Engineers' Handbook. Volumen I. Proces Measurement and analysis. 4ª edición. CRC Press (2003).

Medición de la velocidad de flujo en tuberías mediante speckle dinámico

Tabla 1.1 Características de los medidores de caudal

	Caudal máx./mín.	Presión en % de toda la escala	Escala	Presión máx. bar	Temp. máx. °C	Pérdida de carga máx. m=m c. de a b=bar	Servicio	Materiales de construcción	Coste relativo	Ventajas	Desventajas
Placa	3:11	1-2%	√	400	500	20m	Líqu./vapor Gas	Metales y plásticos	Bajo	Simple, económica	ΔP, fluidos limpios
Tobera	>>	0,9-1,5%	>>	>>	>>	16m	>>	>>	Medio	Simple, precisión	ΔP, cara, >>
Tubo Venturi	>>	0.75%	>>	>>	>>	4m	>>	>>	Muy alto	Presición, poca ΔP	Muy caro, >>
Tubo Pitot	>>	1,5-4%	>>	>>	>>	--	>>	>>	Bajo	Simple, económico	Poca precisión, >>
Tubo Annubar	>>	1%	>>	>>	>>	--	>>	>>	>>	>>	>> >>
Rotámetro	10:1	1-2%	Lineal	>>	250	5m	>>	y vidrio/cerám	>>	>>, >> más preciso	Golpe ariete causa daños
Vertedero	3:1	>>	Especial lineal	Atmosf. 200	600	--	Líquidos	Metales	Alto	>>, coste medio	Caro
Turbina	15:1	0,3%	lineal	200	250	0,7b	Líqu./gas	>>	>>	Precisión, margen amplio	Caro, calibr., fluidos limpios
Sónico	20:1	2%	>>	100	250	Nula	Líquidos	Metal. Plast.		Cualquier líquido, baja ΔP	Caro, calibración sensible a densidad
Placa de impacto	10:1	1%	√	100	400	0,5b	>>	Metales		Fluidos viscosos	Poca capacidad
Magnético	100:1	0,5-1%	Lineal	20-200	150	Nula	>>	Teflón, fibra vidrio (tubo)		Baja ΔP	Caro, líquidos conductores
Disco oscilante	5:1	1-2%	>>	10-150	120	0,3	>>	Metales		Barato	Par pequeño
Pistón oscilante	>>	0,2% 1%	>>	25	150	10b	>>	>>	Medio	Líqu. viscosos, corrosivos	ΔP
Pistón alternativo	>>	0,2%	>>	25	100	0,2m	>>	>>	Alto	Precisión	Caro, voluminoso, ΔP
Cicloidial	10:1	1%	>>	100	150	0,3b	Líqu./gas	>>	Medio	Poca ΔP	Poca presión en caudales bajos
Birrotor	5:1	0,2%	>>	100	60-200	0,4b	Líquido	>>	>>	Precisión, reversible	Margen pequeño
Oval	10:1	0,5%	>>	100	180	1b	>>	>>	>>	Indep. dens. y visc.	ΔP
Paredes deformables	10:1	±0,3%	Lineal	--	--	--	Gas	Metal, plásticos	Medio	Precisión	Voluminoso, ΔP
Torbellino	100:1	0,2% caudal instantáneo	>>	50	100	0,4b	Líqu./gas	>>	>>	Margen, ΔP	Caro
Vórtex	10:1	1%	>>	50	400		Líqu./gas		>>	Vibraciones	Insensible a bajo caudal
Oscilante		0,5%	>>				Líqu./gas	>>	>>	Propano, butano	
Térmico	10:1	1%	>>	100	65	5m	Líqu./gas	>>	Alto	ΔP	Caro, gases, bajos caudales
Axial	5:1	1%	>>	100	120	0,2b	Líqu./gas	>>	>>	ΔP	Caro, margen, poco preciso, caudales bajos
Coriolis	10:1	±0,5%	>>	400	200	0,1 a 3b	Líqu./gas	>>	>>	Independiente, presión, temp., dens.	Caudales medios

1.12 Relación entre flujo y velocidad

Supóngase que un fluido incompresible llena por completo un conducto, como por ejemplo una tubería. Entonces, si entra un fluido por un extremo del ducto, una cantidad igual ha de salir por el otro extremo. Este principio recibe el nombre de ecuación de continuidad.

Si el flujo entra por un extremo con un gasto o caudal Q_1 ha de salir por el otro extremo como un gasto Q_2 , de igual magnitud que el anterior. Así pues, la ecuación de continuidad puede describirse como [7]:

$$Q_1 = Q_2 \quad (1.12)$$

Considerando una sección de un tubo de área transversal constante A y un flujo que avanza en su interior una distancia Δx en un tiempo Δt , la velocidad media de flujo será

$$v = \Delta x / \Delta t \quad (1.13)$$

y el volumen ΔV que sale del tubo es

$$\Delta V = A \Delta x = Av \Delta t \quad (1.14)$$

Por otro lado, el gasto o caudal es igual a la variación de volumen en un tiempo determinado, entonces

$$Q = Av \quad (1.15)$$

Por lo tanto, es posible obtener la velocidad de manera indirecta a través de la medida del caudal, si se conoce el área que atraviesa el fluido.

REFERENCIAS

- [1] Doebelin, E. Sistemas de Medición e Instrumentación. Mc Graw Hill. Quinta edición. 2005.
- [2] Lipták, B. Instrument Engineers' Handbook. Volumen I. Proces Measurement and analysis. 4ª edición. CRC Press (2003).
- [3] Mott, R. Mecánica de Fluidos aplicada. Pearson Education. 6ª edición. Mexico, (2006).
- [4] Kothandaraman, C.P, Rudramoorthy, R. Fluid Mechanics and Machinery. New Age International Publishers. 2ª edición. New Delhi, (2007).
- [5] Loy Upp, E., LaNasa, P. Fluid flow Measurement. Gulf Publising Company. 2ª edición, Usa ,(2002).
- [6] Kuphaldt, T. Lessons In Industrial Instrumentation. Creative Commons Attribution, Usa (2009).
- [7] Kane, J., Sternheim, M. Física. Editorial Reverté. 2ª edición. España 2007.

2. FUNDAMENTOS DE SPECKLE

En este capítulo se presentan las bases físicas implicadas en el fenómeno de Speckle. Se presenta la descripción estadística de los patrones de moteado y los tipos de arreglos utilizados para registrarlos. Por último, se presenta el concepto de speckle dinámico y se muestran algunas técnicas para analizar su actividad.

2.1 Efecto speckle

Al iluminar una superficie difusora con luz coherente, como la que proviene de un láser, se hace visible en el espacio una imagen cubierta con una fina estructura granular con puntos claros y oscuros. Esta distribución moteada de la luz, conocida como patrón de speckle tiene su origen en la interferencia mutua de las numerosas ondas esparcidas por los puntos de la superficie del objeto bajo estudio [1]. En la *figura 2.1* se puede observar como las ondas que provienen de la misma fuente, interfieren destructiva o constructivamente entre ellas, formando un patrón tal como el mostrado en la *figura 2.2*.

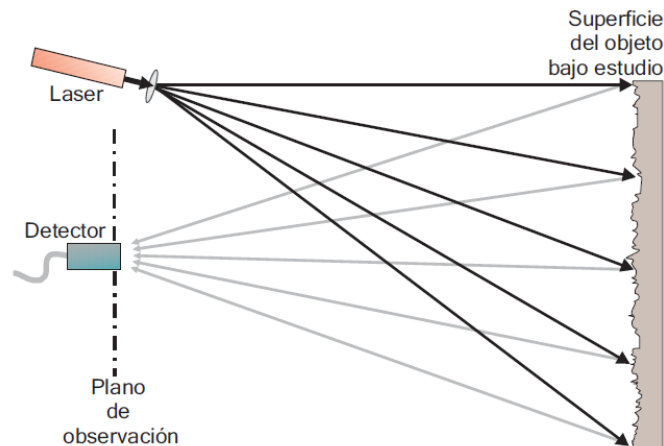


Figura 2.1 Formación de speckle.¹

¹ Kjell J. Gasvik., Optical Metrology, John Wiley and song, third edition, 2002.

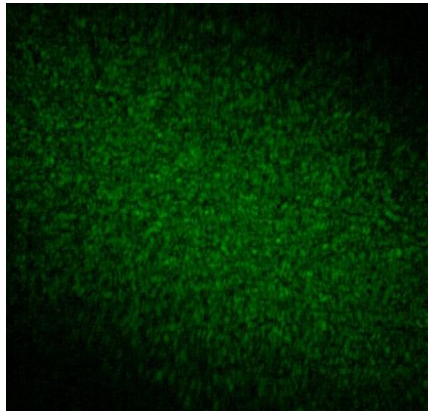


Figura 2.2 Patrón de speckle.

El patrón de interferencia puede brindar información de la superficie iluminada, ya que su distribución de intensidad y variabilidad, dependen de las características y de los procesos que ocurren sobre e incluso bajo la superficie, permitiendo así, obtener información sobre la magnitud de su rugosidad, su movimiento (si es que lo hay), o también sobre los procesos que bajo esta ocurren [2].

2.1.2 Análisis estadístico de los patrones speckle

El fenómeno speckle es un fenómeno aleatorio, y como tal, solo puede ser descrito estadísticamente. Para poder llegar a la descripción de la estadística de la intensidad en un patrón de speckle se debe cumplir que la fuente de luz debe ser coherente, linealmente polarizada y de longitud de onda mucho menor al tamaño de las rugosidades de la muestra que se ilumina.

2.1.2.1 Estadística de primer orden

La estadística de primer orden describe las propiedades puntuales de un patrón de speckle, sin preocuparse por la relación entre las intensidades en diferentes puntos. Se utiliza para describir las variaciones en la intensidad del patrón [1].

La luz en un punto específico $p(x, y, z)$ y en un instante de tiempo t , en un patrón de speckle es la suma de un gran número N de componentes, que representan la contribución de todos los puntos de la superficie rugosa. Bajo la iluminación de una luz monocromática y completamente polarizada, la contribución al campo eléctrico $u(x, y, z, t)$ será [3]:

$$u(x, y, z, t) = A(x, y, z)e^{i2\pi ft} \quad (2.1)$$

Donde f es la frecuencia y A representa el fasor de amplitud del campo. La intensidad de una onda monocromática en un punto del espacio es proporcional al módulo de la expresión (2.1).

$$I(x, y, z) = |u(x, y, z)|^2 \quad (2.2)$$

Como no existe detector capaz de medir en altas frecuencias asociadas con la luz ($\approx 10^{15}$ Hz) es más conveniente trabajar con la medida temporal durante un tiempo T , determinado por el tiempo de respuesta del detector empleado,

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |u(x, y, z)|^2 dt \\ &= \langle |u(x, y, z)|^2 \rangle \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde el operador $\langle \rangle$ representa el valor promedio.

La amplitud del campo eléctrico $A(x, y, z)$ en un punto consiste en una multitud de contribuciones desfasadas provenientes de cada región de la superficie iluminada:

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| e^{i\delta_k} \quad (2.4)$$

Para conocer la función de densidad de probabilidad de la amplitud se deben separar los fasores en su parte real A^r e imaginaria A^i e imponer las siguientes propiedades estadísticas [4]:

- La amplitud $\frac{a_k(x, y, z)}{\sqrt{N}}$ y la fase δ_k de la k -ésima onda difundida son variables estadísticamente independientes y son también independientes de las amplitudes y las fases de las demás ondas.
- Las fases δ_k están uniformemente distribuidas en el intervalo primario $(-\pi, \pi)$.

La relación entre las amplitudes complejas de la intensidad y la fase δ del campo resultante es $A_r = \sqrt{I} \cos \delta$ y $A_i = \sqrt{I} \sin \delta$, o equivalentemente

$$I = [A^r]^2 + [A^i]^2 \quad (2.5)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{A^i}{A^r} \right) \quad (2.6)$$

Teniendo en cuenta que el número de centros de esparcimiento es muy grande, la varianza σ^2 del patrón de speckle polarizado es aproximadamente igual a:

$$\sigma^2 = \langle I \rangle^2 \quad (2.7)$$

Por lo tanto, su desviación estándar σ será:

$$\sigma = \langle I \rangle \quad (2.8)$$

que es igual a la intensidad promedio.

La función de densidad de probabilidad para la intensidad está dada por:

$$p(I) = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}} & \text{para } I > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.9)$$

De manera similar, la función de densidad de probabilidad para la fase es:

$$p(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{para } -\pi < \theta < \pi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.10)$$

El n-esimo momento estadístico se calcula mediante:

$$\langle I^n \rangle = n!(2\sigma^2)^n \quad (2.11)$$

de donde se puede deducir que

$$\langle I \rangle = (2\sigma^2) \quad (2.12)$$

En la *figura 2.3* se presenta la función de distribución de intensidad asociada a un patrón de speckle que obedece a una estadística exponencial negativa.

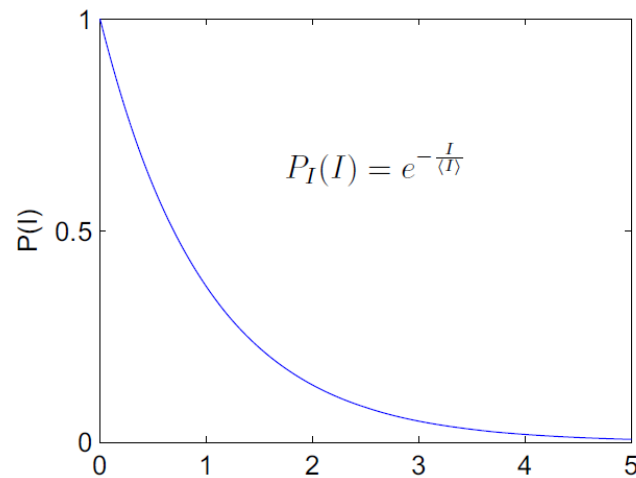


Figura 2.3 Función de distribución de intensidad.¹

2.1.2.2 Estadística de segundo orden

La estadística de segundo orden de un patrón de speckle describe a qué velocidad varía la intensidad de punto a punto en el patrón, lo cual brinda una indicación de la actividad del speckle. Las funciones más comunes usadas para representar la estadística mencionada son la función de autocorrelación de la intensidad y su transformada de Fourier, es decir el espectro de potencia. Su análisis muestra que la medida del speckle está determinada enteramente por la apertura del sistema óptico usado (para imágenes de speckle) o por las dimensiones del área iluminada sobre la superficie en estudio (para speckle de campo lejano).

Considerando que se ilumina una superficie rugosa con un haz de luz monocromática y la luz dispersada es observada a una distancia, sin ninguna intervención de elementos ópticos. La componente linealmente polarizada $A(x,y)$ del campo eléctrico sobre el plano de observación, representa el campo speckle de interés [3].

La función de autocorrelación R_I de la distribución de irradiancia I en el plano (x,y) será:

$$\begin{aligned} R_I(x_1, y_1; x_2, y_2) &= \langle I(x_1, y_1) I(x_2, y_2) \rangle \\ &= \langle |A(x_1, y_1)|^2 |A(x_2, y_2)|^2 \rangle \end{aligned} \quad (2.13)$$

¹ Dainty, J. Laser speckle and related phenomena. Capítulo 1: Statistical properties of laser speckle patterns. Goodman, J. Springer Verlag. Berlin, 1975.

Donde A representa el campo complejo. El ancho de esta función provee una medida razonable del tamaño de un punto speckle.

Si el tamaño de la superficie rugosa es en comparación con la longitud de onda, entonces el campo $A(x,y)$ es una variable aleatoria compleja circular Gaussiana en cada punto (x,y) y la función de autocorrelación de la intensidad puede ser expresada en términos de la función de autocorrelación del campo $J(x,y)$, que viene dada por [3]:

$$J_A(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle A(x_1, y_1) A^*(x_2, y_2) \rangle \quad (2.14)$$

mediante la siguiente expresión:

$$R_I(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) \rangle \langle I(x_2, y_2) \rangle + J_A(x_1, y_1; x_2, y_2) \quad (2.15)$$

El cálculo de esta función se realiza con la ayuda del principio de Huygens-Fresnel, expresado a través de la aproximación de Fresnel

$$A(x, y) = \frac{1}{\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right) d\xi d\eta \quad (2.16)$$

donde $A(\xi, \eta)$ representa el campo en un punto (ξ, η) sobre la superficie difusora y es dependiente de la forma de la superficie. Si se asume un área iluminada de forma cuadrada de lado D , la función de autocorrelación será:

$$R_I(\Delta x, \Delta y) = \langle I \rangle^2 \left[1 + \text{sinc}^2\left(\frac{D\Delta x}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{D\Delta y}{\lambda z}\right) \right] \quad (2.17)$$

donde $\Delta x = x_2 - x_1$ y $\Delta y = y_2 - y_1$. Una aproximación razonable para el tamaño promedio de los granos de speckle es el valor Δx , para el cual la función $\text{sinc}(L\Delta x/\lambda z)$ alcance su primer caída a cero, nombrando la distancia como δx se tiene que:

$$\delta x = \frac{\lambda z}{D} \quad (2.18)$$

Así en fuentes no monocromáticas se tiene un patrón de speckle para cada longitud de onda λ_i con un diámetro medio diferente.

2.1.3 Tamaño de grano en patrones de speckle

Aunque en un patrón de speckle el tamaño de las motas negras y blancas varía, puede hablarse de un tamaño promedio. Se presentará el tamaño de speckle para dos configuraciones distintas, speckle objetivo y speckle subjetivo [5].

El patrón de speckle objetivo es el que se forma en el espacio debido a la propagación libre de la luz coherente reflejada o transmitida por una superficie difusora. En la *figura 2.4* se presenta un diagrama de formación de speckle por propagación libre, donde se ilumina una superficie difusora de diámetro D con luz coherente de longitud de onda λ y el patrón de speckle se observa en una pantalla situada a una distancia z de la superficie. Un punto cualquiera de la pantalla P recibe luz de todos los puntos de la superficie difusora. El patrón de speckle en P es el resultado de la superposición de todos los patrones de franjas generados, como en la doble rendija de Young, por todos los pares de puntos de la superficie. Así, un par de puntos separados una distancia l dan lugar a un patrón de franjas de frecuencia espacial $f = l/\lambda z$. Las franjas de mayor frecuencia f_{max} corresponden al par de puntos situados en los extremos, para los cuales $f_{max} = D/\lambda z$. El periodo de esta frecuencia máxima es una medida del menor tamaño del speckle objetivo σ_{ob} .

$$\sigma_{ob} = \frac{\lambda z}{D} \quad (2.19)$$

El patrón de speckle subjetivo es el que se forma en el plano imagen de una lente. Se produce por la interferencia de las ondas provenientes de los puntos de una zona de la superficie difusora y que pasan a través de la lente. En el plano imagen se suman, aleatoriamente desfasadas, las funciones respuesta impulsional de cada punto, generándose de este modo el patrón de speckle. En este caso, el tamaño de speckle subjetivo σ_s viene determinado por el disco de Airy [2].

$$\sigma_s = \frac{\lambda z_i}{A} \quad (2.20)$$

donde A es el diámetro de la lente, z_i es la distancia de la lente al plano imagen como se observa en la *figura 2.5*.

Teniendo en cuenta que para una lente la apertura numérica F es igual a

$$F = \frac{f}{A} \quad (2.21)$$

donde f es la distancia focal de la lente y que además, el aumento m del sistema se calcula mediante:

$$m = \frac{Z_i - f}{f} \quad (2.22)$$

se obtiene para el tamaño del menor speckle subjetivo

$$\sigma_s = (1 + m)\lambda N \quad (2.23)$$

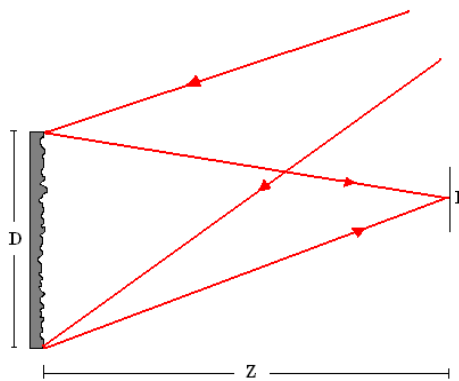


Figura 2.4 Formación de speckle por propagación libre.⁷

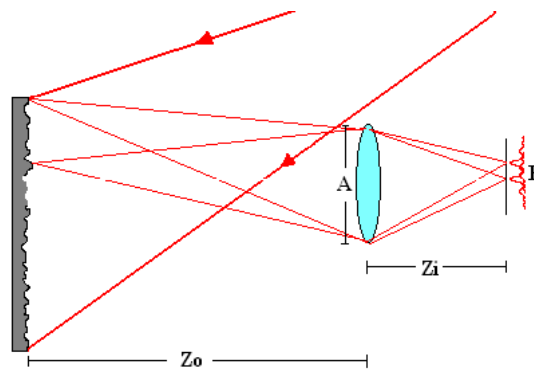


Figura 2.5 Speckle con formación de imágenes.⁷

2.2 Speckle dinámico

Si el patrón de speckle es generado por una superficie rugosa y esta superficie experimenta movimientos o deformaciones, el diagrama de speckle observado se vuelve dinámico. Lo mismo ocurre si el patrón fue generado por dispersores en movimiento, sea por fenómenos de *scattering* simple o múltiple.

Usualmente, se distinguen dos tipos de *speckles*: *Speckle* de traslación y *speckle* dinámico (*boiling speckles*) [6]. Los *Speckles* de traslación son aquellos en los que su forma no cambia aún después de desplazamientos considerables del difusor y los granos de speckle se mueven como un todo. Ocurre en desplazamientos de objetos difusos sólidos. Los speckles dinámicos ocurren cuando un difusor se mueve por zonas, se deforma, cambia su índice de refracción, etc., sin desplazarse significativamente de su posición. Es un comportamiento típico de los objetos vivos, por lo que también se conoce como bio-speckle.

2.2.1 Descriptores de la actividad de patrones de speckle dinámico

El análisis temporal de una señal de speckle dinámico provee información acerca del fenómeno que ocasiona estos movimientos microscópicos. Existe una gran cantidad de descriptores que han sido desarrollados para caracterizar estas señales pero no todos ellos son apropiados para todas las aplicaciones y no existe un criterio definido de cómo hacer una elección. A continuación se presentan algunos descriptores comúnmente utilizados para estudiar señales y secuencias de imágenes de speckle dinámico.

2.2.1.1 LASCA (Análisis del Contraste del Láser Speckle)

El método LASCA, por sus siglas en inglés “Laser Speckle Contrast Analysis” fue propuesto por Briers y Webster [7] para medir flujo de sangre capilar y posteriormente usado en otras aplicaciones.

Este método consiste en capturar un cuadro con un tiempo de exposición adecuado, el software divide la imagen en cuadros o ventanas espaciales de tamaño prefijado, calcula el contraste local a cada uno de ellos y lo registra de acuerdo a una tabla de colores que corresponden a diferentes velocidades. El tamaño de los cuadros es importante porque hay relación entre la precisión de la estadística y la pérdida de resolución, cuanto mayor es el tamaño de los cuadros, mayor es la precisión estadística y menor es la resolución de la imagen resultante. Normalmente se emplean recuadros de 5x5 y 7x7 [8].

El principio de esta técnica es el siguiente: una imagen de objetos en movimiento que se captura en un tiempo dado, se observa con cierto grado de borrosidad (*blur*), esto se debe a que, en el caso de el speckle dinámico hay una reducción en el contraste y esto se observa en cualquiera que sea el movimiento del speckle. Para encontrar una medición cuantitativa de la velocidad se debe calcular la relación entre el contraste speckle y la velocidad del fluido. Hay una relación claramente marcada entre la velocidad y el “borroneo” en la imagen, ya que cuanto mayor es la velocidad más rápidas son las fluctuaciones y ocurre un mayor borroneo para un tiempo dado de integración.

Si se supone un proceso ergódico, se puede establecer una relación matemática entre el contraste del speckle y la estadística temporal de la fluctuación del speckle mediante la siguiente ecuación [7]:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{T} \int_0^T C_t(\tau) d\tau \quad (2.24)$$

Donde σ_s^2 es la varianza espacial de la intensidad del patrón de speckle, T es el tiempo de integración y $C_t(\tau)$ es la autocovarianza de las fluctuaciones temporales de la intensidad de un speckle simple. La autocovarianza no es otra cosa que la autocorrelación normalizada y se define de la siguiente manera:

$$C_t(\tau) = \langle (I(t) - \langle I \rangle_t)(I(t + \tau) - \langle I \rangle_t) \rangle_t \quad (2.25)$$

La autocorrelación es la transformada de Fourier inversa de la densidad espectral de potencia (teorema de Wiener-Khinchine). Suponiendo una distribución de velocidad Lorentziana, el contraste puede ser entonces calculado analíticamente mediante

$$C = \frac{\sigma_{x,y}^2}{\langle I \rangle} = \sqrt{\frac{\tau_c}{2T} \left[1 - \exp\left(\frac{-2T}{\tau_c}\right) \right]} \quad (2.26)$$

Donde T es el tiempo de integración y τ_c es el tiempo de correlación de las variaciones de intensidad que, básicamente dependen de las propiedades de distribución de la muestra.

2.2.2.2 Análisis de correlación

El análisis de correlación de la intensidad como una función del tiempo es un método clásico para la caracterización de patrones de speckle dinámico. Este permite determinar la variabilidad del patrón speckle a medida que el tiempo transcurre [9].

El grado de correlación entre las distribuciones espaciales de la intensidad del patrón de speckle en el momento inicial $I(0, x, y)$ y en el tiempo t $I(t, x, y)$, se caracteriza por la función de correlación mutua descrita por[10]:

$$B(t) = \langle I(0, x, y)I(t, x, y) \rangle \quad (2.27)$$

Donde $\langle \rangle$ denota el promedio sobre el área S de la zona seleccionada para el procesamiento del patrón de speckle.

$$B(t) = \frac{1}{S} \int I(0, x, y) I(t, x, y) dx dy \quad (2.28)$$

2.2.2.3 Métodos basados en diferencias

Los métodos basados en diferencias son la forma más intuitiva y simple de registrar los cambios entre cuadros de speckle. Consisten en substraer dos cuadros y obtener su valor absoluto, lo cual registra los cambios de intensidad para cada pixel en dos instantes. Si se analizan las diferencias entre dos valores de intensidad temporalmente continuos se denomina diferencias promediadas, que en términos matemáticos se expresa como [11]:

$$I = \sum_{n=1}^N \left| \frac{I(n) - I(n-1)}{I(n) + I(n-1)} \right| \quad (2.29)$$

Donde $I(n)$ es la intensidad de la señal de speckle que ha sido integrada durante el intervalo de escaneo.

Mientras que si se tienen en cuenta las diferencias con todos los valores de intensidad presentes en la señal se denomina diferencias generalizadas, que en términos matemáticos se expresa como

$$I = \sum_k \sum_l |I_k - I_{k+l}| \quad (2.30)$$

Donde I_k es la intensidad de la señal de speckle en la muestra k -ésima. Cuanto mayor es la magnitud de este descriptor, mayores son las variaciones de la señal de speckle.

2.2.2.4 THSP (Temporal History of Speckle Patterns)

La historia temporal de los patrones de speckle surge de registrar un arreglo unidimensional de señales de speckle. De esta manera se consigue una imagen donde la dimensión horizontal es el tiempo y la dimensión vertical es el espacio [12].

Este método se construye agrupando líneas de imágenes sucesivas de cuadros de speckle en una pseudo-imagen. Para construir esta pseudo-imagen se elige de a una columna, por ejemplo la columna central de cada imagen. Si se tiene una secuencia de m imágenes y de n pixeles de altura, la pseudo-imagen generada tendrá un tamaño de $m \times n$ pixeles. La historia temporal se leerá en sentido horizontal. Siendo la primera columna de la pseudo-imagen perteneciente a la primera imagen de la secuencia, y así hasta llegar a la última columna, perteneciente a la última imagen (imagen m). La actividad de

la muestra se determina por las variaciones de la intensidad que se presentan en la dirección horizontal.

2.2.2.5 Análisis de la matriz de co-ocurrencia

Un descriptor útil para caracterizar la actividad en un patrón de speckle dinámico se basa de la matriz de co-ocurrencia (COM), que agrupa el número de ocurrencias de un valor de intensidad i seguido por otro valor j , N_{ij} . Se define como [13]

$$COM = [N_{ij}] \quad (2.31)$$

La diagonal principal de la COM está relacionada con regiones homogéneas de la señal, mientras que los elementos no nulos y alejados de esta diagonal indican ocurrencias de alto contraste.

Una medida de la actividad del patrón se obtiene a partir de la medida del esparcimiento de los valores de la matriz $\mathbf{M} = \{m_{i,j}\}$ alrededor de la diagonal principal es la suma del producto de los elementos m_{ij} por su distancia a la diagonal. Se define entonces el momento de inercia MI de esta matriz como [14]

$$MI = \sum_i \sum_j m_{ij} (i - j)^2 \quad (2.32)$$

Entre mayor sea este valor, mayor es la actividad del sistema analizado.

REFERENCIAS

- [1] Dainty, J. Laser speckle and related phenomena. Capitulo 1: Statistical properties of laser speckle patterns. Goodman, J. Springer Verlag. Berlin, 1975.
- [2] Sirohi, R. S., "Speckle Metrology", CRC Press, New York, 1993.
- [3] J. W. Goodman., "Statistical properties of laser speckle patterns in laser speckle and related phenomena", Springer-Verlag. 1965.
- [4] Chicarro, J. Estudio de la magnetostricción por interferometría de speckle. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid (2000).
- [5] Kjell J. Gasvik., Optical Metrology, John Wiley and song, third edition, 2002.

- [6] Rabal, H., Braga, R. Editors. Dynamic Laser Speckle and Applications. Capitulo 2. Dynamic speckle, origin and features , 2008.
- [7] J. Briers y S. Webster, "Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow," *Journal of Biomedical Optics* (1996).
- [8] Briers, J., et al. Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow. Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program. Wroclaw (2006). 328-332.
- [9] Patiño, M. Determinación del tiempo de coagulación en seres humanos a partir speckle dinámico. Tesis Maestría. Universidad del Cauca. (2012).
- [10] Kulchin, Y. et al. Correlation Method for Processing Speckle Patterns of Dynamic Light Scattering by Small Particles Based on Spatial Averaging of Data. Vol. 46 No. 3 (2010) 95.
- [11] Sendra, G. Análisis de actividad en patrones de speckle dinámico. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Mar del Plata, Capitulo 3. (2009)
- [12] Dai Pra, L. Passoni, L. Rabal, H. Evaluation of laser dynamic speckle signals applying granular computing. *Signal Processing* 89 (2009) 266.
- [13] Arizaga, R. Trivi, M. Rabal, H. Speckle time evolution characterization by the co-occurrence matrix analysis. *Optics & Laser Technology* 31 (1999) 163.
- [14] Arizaga, R. Trivi, M. Rabal, H.. Numerical model for dynamic speckle: an approach using the movement of the scatters. *Journal of optics: pure and applied optics* (2003).

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los requerimientos para la adquisición y análisis de los patrones de speckle, como también el sistema desarrollado para tal fin. Primero se establecieron los requisitos necesarios para el adecuado funcionamiento del sistema, luego la configuración experimental que se implementó, describiendo las partes que la componen, al igual que el software utilizado para el análisis de los datos capturados. Por último se describe un protocolo para la estandarización del proceso.

3.1 Diseño y configuración experimental

El sistema desarrollado consta de tres partes: el sistema óptico, el sistema de circulación de flujo y el software de registro y análisis.

El sistema óptico consta de una fuente de luz coherente: un láser, de un detector: cámara web, de un espejo, polarizadores y lentes. El sistema de circulación estaba conformado por una motobomba (bomba eléctrica), diferentes configuraciones de tubos opacos, mangueras y válvulas para variar el flujo de agua. El software desarrollado consta de una etapa de adquisición de video y las rutinas necesarias para su respectivo procesamiento.

3.1.1 Sistema óptico

El sistema óptico varía según la configuración de speckle objetivo y speckle subjetivo [1]. En ambos casos, se hace uso de la misma fuente de luz y el mismo sensor de imagen, aunque con la adición de un sistema formador de imágenes para el segundo caso. Los requerimientos específicos de cada configuración de speckle se explican a continuación.

3.1.1.1 Sistema de iluminación

Un aspecto muy importante del sistema es la iluminación, ya que debe encargarse de brindar la luz necesaria para formar el patrón de speckle y su registro. Esta debe proporcionar unas condiciones de iluminación uniforme e independiente del entorno [2].

Para la formación del patrón de speckle es necesaria una fuente de luz coherente, como la proveniente de un láser, en este caso se usó un diodo láser verde de 555nm de longitud de onda.

3.1.1.2 Sensor de imagen

Es el encargado de recoger las características del objeto bajo estudio. Los sensores de imagen son componentes sensibles a la luz que modifican su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que perciben.

La elección del sensor de imagen se hace de acuerdo con los requisitos del sistema. En este caso se debe garantizar que la cámara este ubicada de tal forma que el tamaño de grano de los speckles sea mucho mayor que el tamaño de píxel del detector, esto con el fin de asegurar el adecuado muestreo espacial del patrón. El sistema debe ser independiente del tiempo y de la intensidad, para evitar variaciones; además, el sensor de imagen debe ser de bajo costo y fácil de adquirir en el mercado por limitaciones de presupuesto.

Para este proyecto se probaron dos cámaras web: Microsoft LifeCam HD-3000 y PlayStation Eye. De las cuales se seleccionó la segunda, ya que permite el mejor registro de los patrones de speckle y la velocidad de captura de la información pueda detectar las variaciones temporales de la intensidad, que se presentan en el patrón, con buena resolución durante el tiempo de registro.

Con esta cámara se obtuvieron imágenes de 320x240 píxeles, con una tasa de captura máxima de 166 *frames* por segundo y por medio del software se configuró una ganancia constante.

3.1.1.3 Adquisición de las imágenes

El primer tratamiento para las imágenes capturadas, es la selección de los canales de color apropiados que se van a usar en cada uno de los métodos propuestos. En este caso, debido a que la fuente de luz coherente es un láser con longitud de onda en el rango de color verde, la mayor parte de la información se encuentra en éste canal, lo cual se evidencia en los promedios de intensidad captados por cada canal, que fueron, para una de las imágenes, 8 para el canal rojo, 10 para el canal azul y 96 para el canal verde. La *figura 3.1* muestra un ejemplo de imagen capturada y sus respectivos canales por separado.

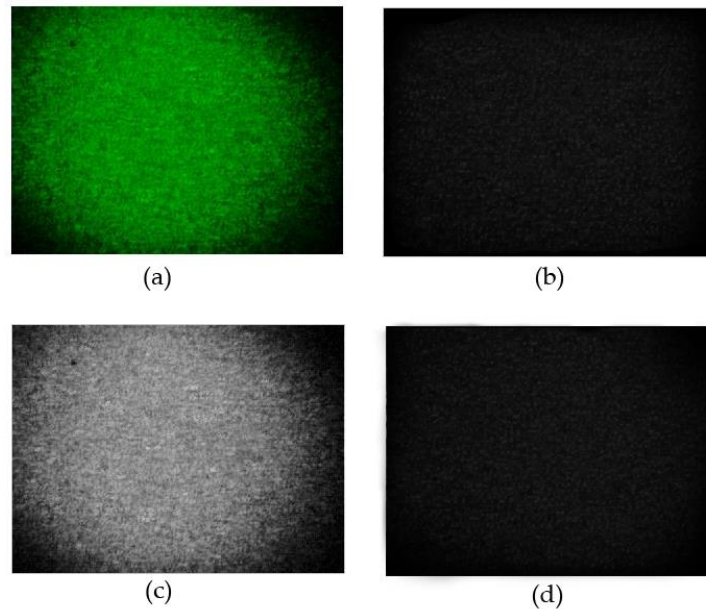


Figura 3.1 a) Imagen capturada, con sus canales: b) Canal rojo, c) Verde y d) Azul.

3.1.2 Sistema de circulación de flujo

Se realizaron diferentes configuraciones en el montaje de la tubería y la fuente de alimentación. A continuación se describe cada una de las configuraciones.

Configuración 1

Esta es la configuración básica utilizada, a partir de ella se derivan las demás, cada una diseñada para lograr una mejor captura de los datos. En este caso, se trata de un sistema cerrado de bombeo de agua, a través de una tubería de PVC de media pulgada, alimentado por una motobomba con una capacidad máxima de 35 litros /min. La sección de la tubería donde se registraron las imágenes de speckle se aisló de la perturbación de la motobomba por medio de mangueras flexibles y se aisló del movimiento sujetándola de dos puntos a una superficie firme, mediante prensas. En la *figura 3.2* se puede ver un diagrama de este montaje.

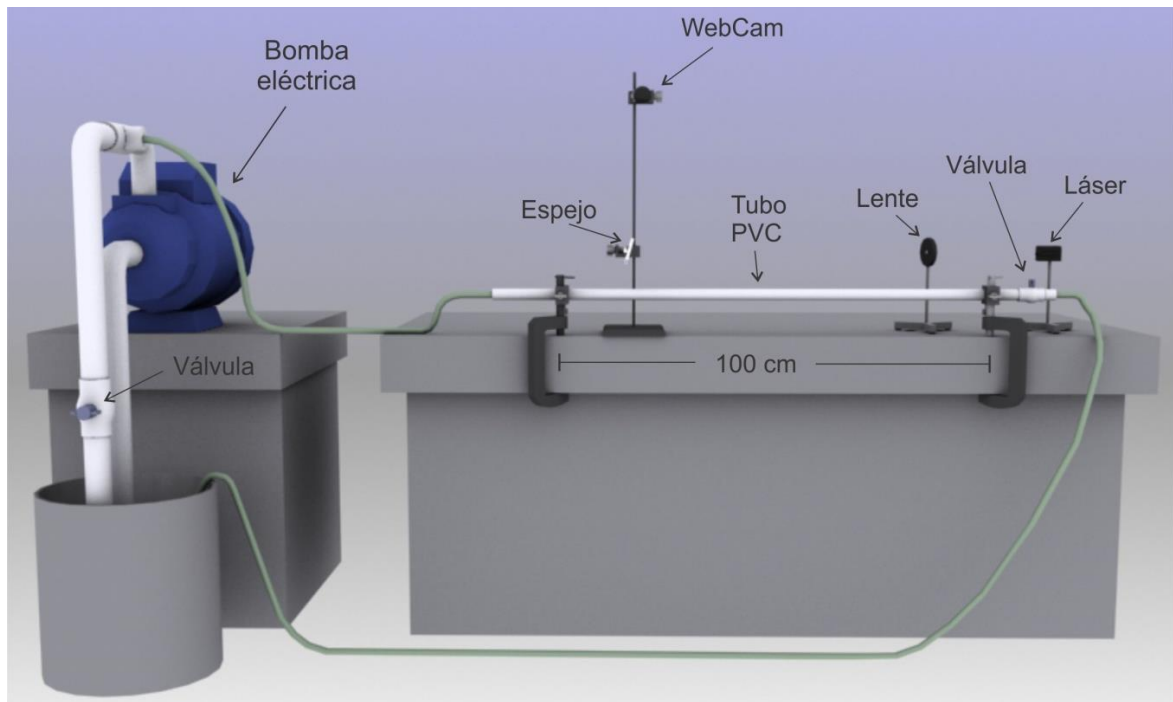


Figura 3.2 Configuración 1 del montaje experimental.

Esta configuración presentó problemas con la uniformidad del fluido, debido a la presencia de discontinuidad en el interior de la tubería, además no se puede garantizar el llenado completo de la tubería. Dicha discontinuidad produce vibraciones inesperadas de forma discontinua que influyen en la medida de la velocidad.

Configuración 2

Para solucionar el problema de turbulencias generadas con la anterior configuración, se cambió la sección horizontal del tubo principal por una sección con un desnivel en forma de pozo, cuya función es detener las burbujas en la parte superior y garantizar un llenado completo de la tubería en la región de medida. El esquema de esta configuración se puede ver en la *figura 3.3*.

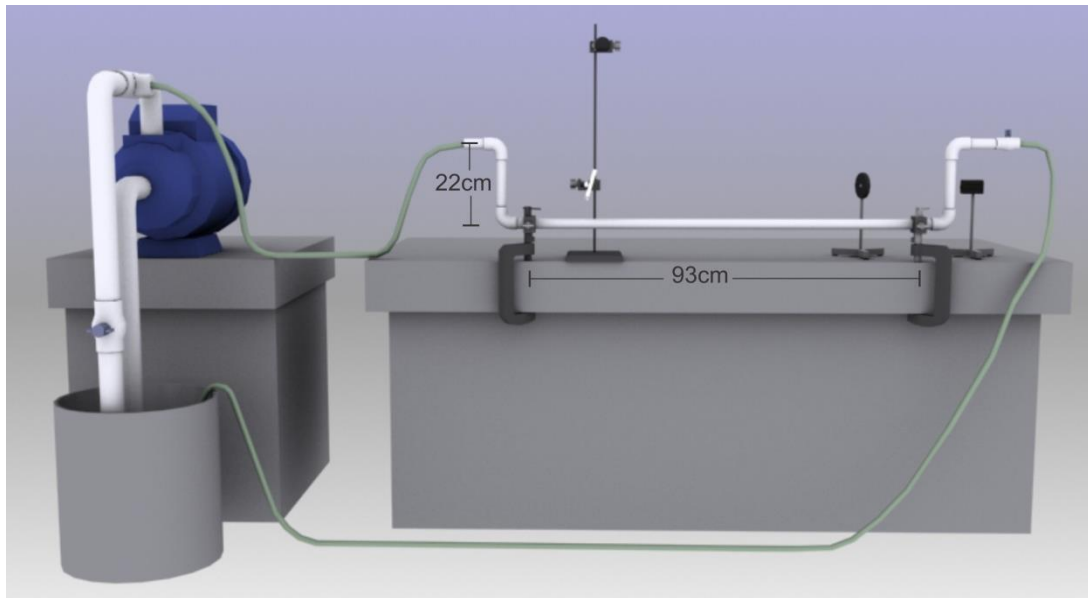


Figura 3.3 Configuración 2.

Configuración 3

Esta configuración se diseñó con el fin de comprobar el funcionamiento del método en una sección donde la vibración se vea reducida; para ello, se ubicaron las prensas más cerca una de la otra. Además para evitar la vibración en los extremos restantes del tubo, se redujo su longitud. En la *figura 3.4* se observan las dimensiones del nuevo pozo.

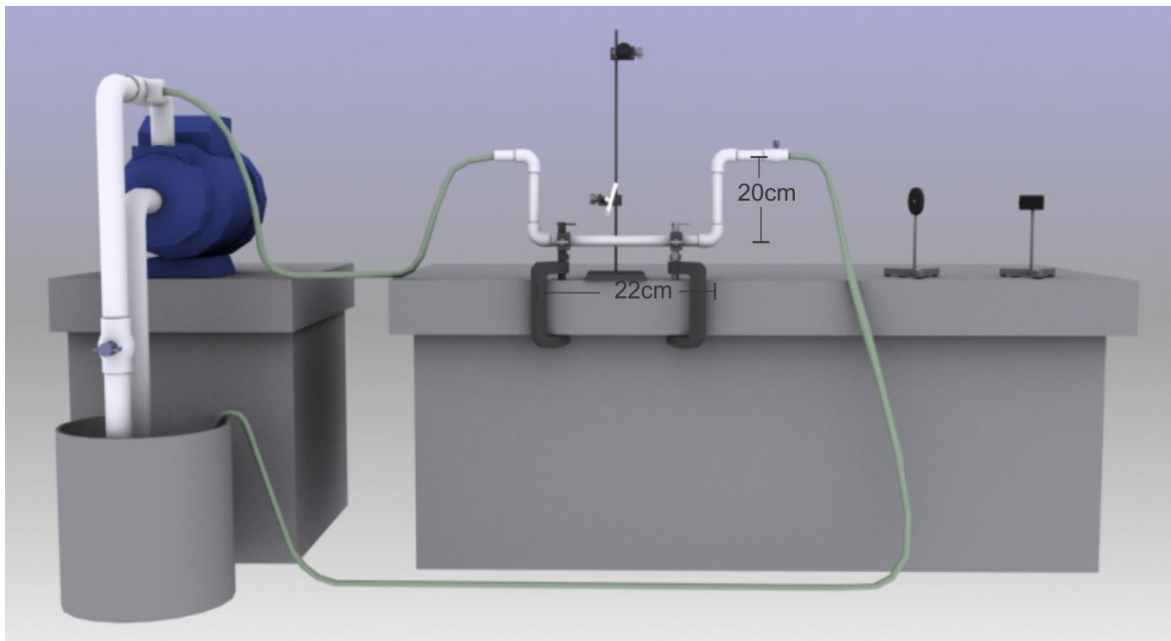


Figura 3.4 Configuración 3.

Configuración 4

Esta última configuración presenta una importante variación respecto a las anteriores, pues se ha sustituido la fuente de alimentación, es decir, la bomba eléctrica, por una fuente de agua a presión por gravedad (suministro de agua domiciliaria). Por tal razón, el sistema de flujo ha tenido que ser de tipo abierto.

La finalidad de esta disposición es analizar el sistema con las menores vibraciones externas posibles, para comparar con los resultados obtenidos con la bomba eléctrica.

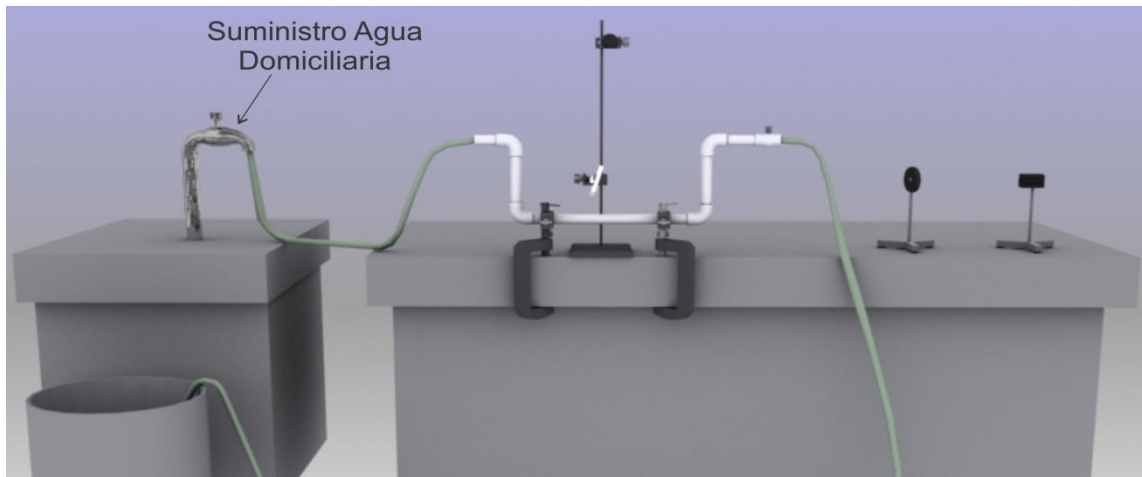


Figura 3.5 Configuración 4.

3.1.3 Software

El software está encargado del procesamiento y despliegue de las imágenes obtenidas mediante speckle. Para este propósito se desarrolló una aplicación basada en la plataforma *Qt Creator*¹, la cual cumple con las diferentes funciones dentro del sistema. Para la adquisición de las imágenes se utilizó el programa *CL-Eye Test*², el cual permite la configuración de la cámara, la captura del video y el almacenamiento. En *Qt* se implementaron los algoritmos que permitieron el análisis estadístico de las imágenes y el tratamiento de los datos para su posterior análisis, con ayuda de la biblioteca *OpenCv*.

En la *figura 3.6* se muestra la interfaz gráfica desarrollada, donde se pueden visualizar las imágenes capturadas; además cuenta con diferentes secciones dedicadas a la

¹ *Qt Creator*, versión 2.0.1-2010

² *CL-EYE TEST*, versión 2011

manipulación y la aplicación de algoritmos de análisis estadístico. Posee una sección llamada *Videos*, que permite la organización de los videos a estudiar y otras secciones con configuraciones para los análisis de correlación (*Corr*) y contraste (*Contrast*). Una sección llamada *Match* permite realizar un seguimiento detallado del movimiento de los patrones de speckle.

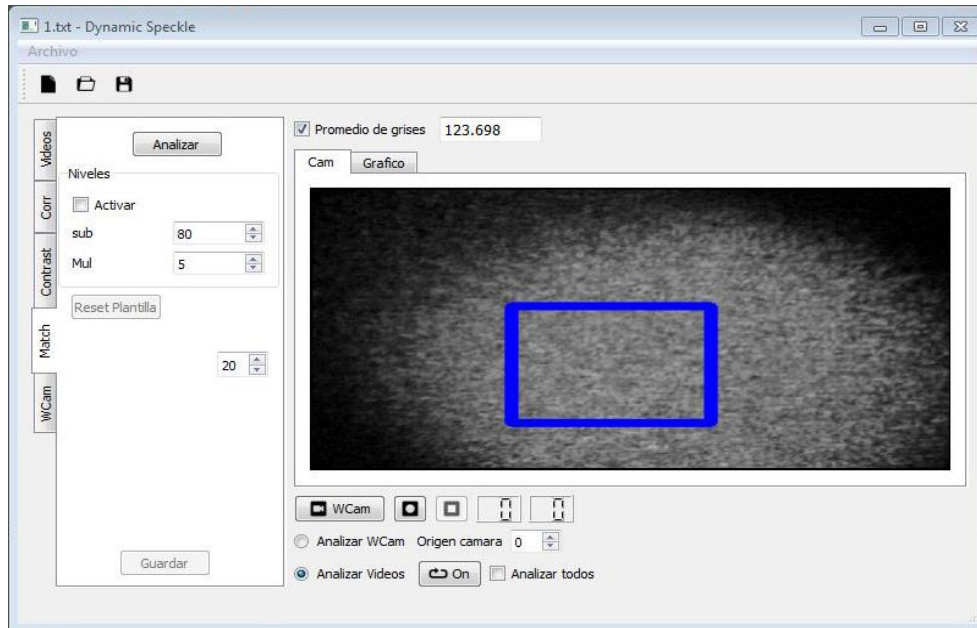


Figura 3.6 Interfaz gráfica desarrollada.

3.2 Análisis de los patrones de speckle

Contraste

El método consiste en medir las diferencias entre los niveles claros y oscuros de la imagen, para ello, se procede a extraer una región de la imagen para realizar los análisis, con el fin de obtener un área uniforme y agilizar el estudio. La extracción de esta área también se realiza en los demás métodos de análisis.

El estudio de contraste se puede realizar a las imágenes directamente capturadas con la premisa de que su contraste se verá reducido por el efecto del emborronamiento que se produce cuando aumenta la velocidad de cambio de los patrones de speckle. Por otra parte, se puede incrementar el efecto de emborronamiento promediando conjuntos de imágenes consecutivas, reduciendo así, saltos inesperados en los valores (filtrado temporal).

Correlación

Para el análisis de correlación se implementó la *ecuación 2.28*. Se estudiaron imágenes consecutivas y grupos consecutivos de imágenes promediadas. Este análisis se encarga de determinar la similitud entre imágenes consecutivas, generando un coeficiente que fluctúa entre cero y uno, siendo uno el valor que describe la ausencia de cambio en las imágenes, mientras que cero representa la diferencia estadística total entre las imágenes. El valor de este coeficiente es un indicador de la actividad que se presenta en el patrón [4].

Análisis de rango de movimiento

En este método el objetivo es realizar un análisis del movimiento del speckle, midiendo los cambios de posición del mismo, entre imágenes consecutivas. Para realizar este seguimiento se debe seleccionar una región de interés dentro de la imagen que sirva de plantilla a buscar en las imágenes siguientes, teniendo en cuenta que su tamaño sea menor y nunca cercano al tamaño de la imagen original. Para facilitar el reconocimiento del patrón se realzan las características de la imagen, oscureciendo las partes con menor intensidad de luz y haciendo más brillantes las partes claras. Este último paso se logra restando un valor constante a toda la imagen y luego multiplicando por otra constante, el resultado de esta operación se muestra en la *figura 3.7*.

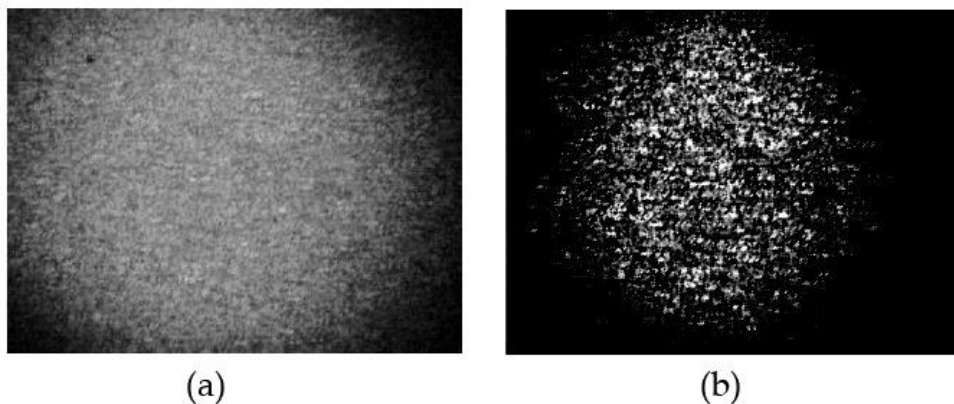


Figura 3.7 a) Canal verde de la imagen original, b) Imagen del canal verde con características realizadas mediante substracción y multiplicación de sus valores.

Posteriormente, se selecciona una región de la imagen y se procede a buscar su ubicación en la imagen siguiente. Este proceso se realiza mediante la función `cvMatchTemplate` de OpenCV. Esta función entrega como resultado una imagen con valores de intensidad, siendo la mayor intensidad el lugar más probable donde se encuentra la plantilla. La *figura 3.8* muestra la imagen resultado de la función

cvMatchTemplate, en la cual se puede observar un punto de mayor intensidad, que representa el centro de la plantilla. Cabe mencionar que la dimensión de la imagen resultante es igual a la dimensión de la imagen original menos el tamaño de la plantilla.

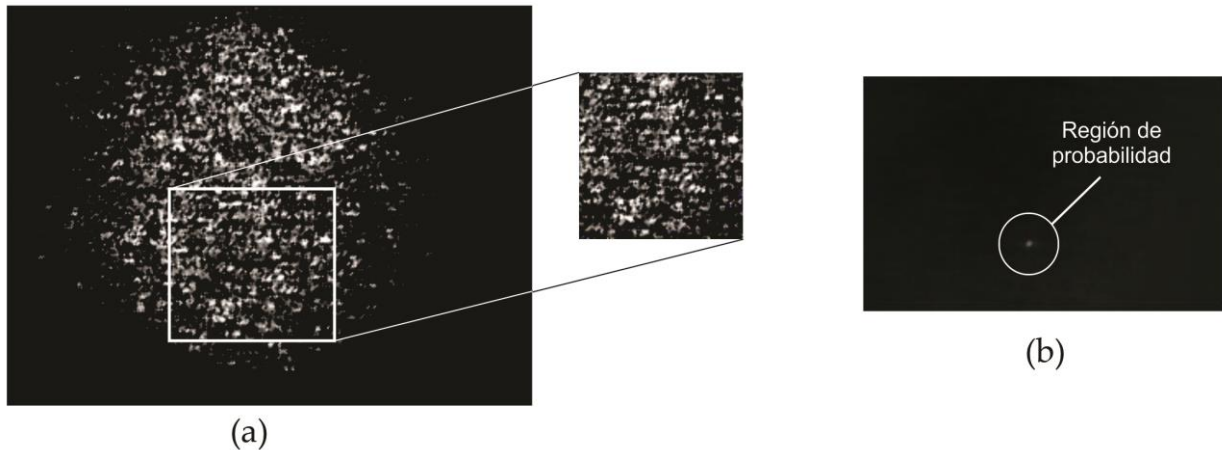


Figura 3.8 a) Región extraída de la imagen realzada, b) Resultado de la función cvMatchTemplate.

Como el valor de intensidad del punto encontrado puede variar, se debe binarizar la imagen, para facilitar la medición de dicha posición. Esto es, eliminar la información irrelevante de la imagen, dando el valor de 1 a las intensidades por encima de una intensidad determinada y 0 a las restantes. El resultado de este proceso se muestra en la *figura 3.9*, para un umbral de separación de 50 en niveles de gris.

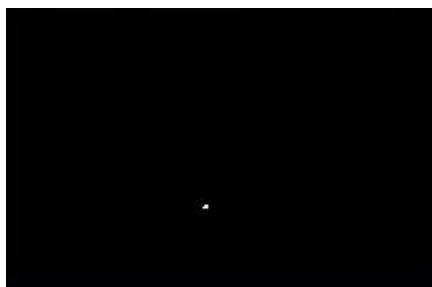
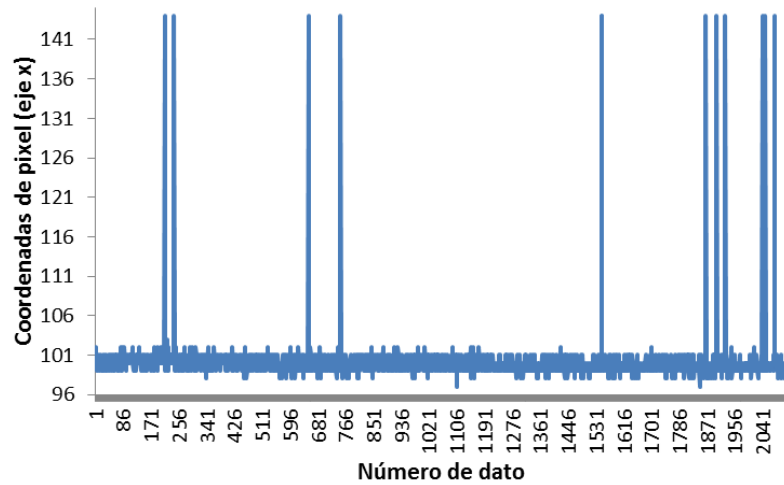


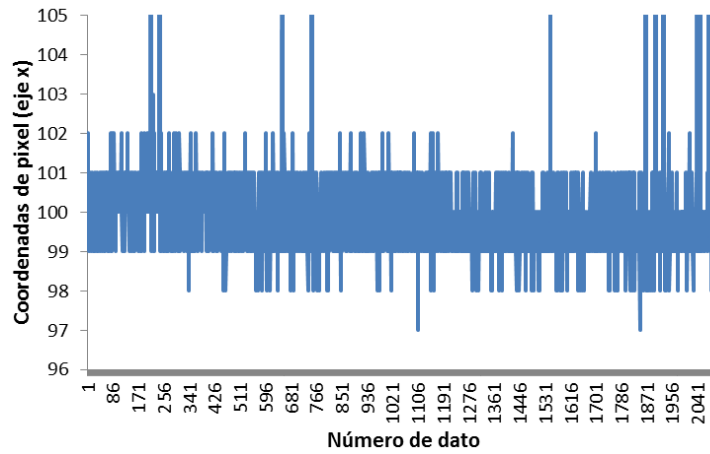
Figura 3.9 Imagen de posiciones binarizada.

El último proceso realizado sobre las imágenes, es la medida de la posición en términos de las coordenadas de los píxeles en la imagen. Para ello se hace un recorrido sobre la imagen binarizada, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, buscando el primer píxel con un valor igual a 1. En este momento se detiene el recorrido y se guardan las coordenadas que describen la posición de la plantilla dentro de la nueva imagen.

Realizando este proceso a todas las imágenes capturadas, se puede obtener el rango del desplazamiento del speckle como respuesta a la vibración de la superficie de la tubería. Las posiciones medidas en cada una de las imágenes puede ser almacenada y graficada para cada uno de los ejes cartesianos por separado, lo que brinda una mejor visión sobre el movimiento del speckle y permite discriminar datos. En la *figura 3.10* se muestran las coordenadas de movimiento encontradas en el eje x . Los valores sobre 103 no se tienen en cuenta ya que son ruido producido durante el proceso de binarizado; en este caso, los datos desechados llegan hasta 140 y no hacen parte de los valores esperados que se encuentran alrededor del rango entre 97 y 102.



(a)



(b)

Figura 3.10 Coordenadas de movimiento en el eje x . a) Grafico completo, b) Zoom a los datos útiles.

Un histograma de los datos obtenidos para cada eje facilita la elección del límite de movimiento más adecuado para el conjunto de datos. En la *figura 3.11* se muestra el histograma de los valores de movimiento del eje x para una de las pruebas.

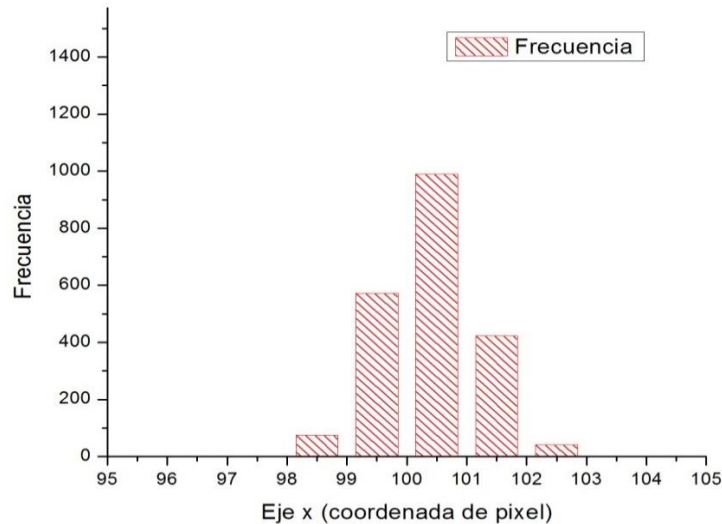


Figura 3.11 Ejemplo de Histograma de los valores de movimiento del speckle en el eje x .

En el histograma de la *figura 3.11* se ve una cantidad relevante de valores en las posiciones 99, 100 y 101, que indican que el speckle se ha movido entre dos unidades en el eje x . Es importante aclarar que las posiciones 99, 100 y 101 dependen de la coordenada donde se extrajo la imagen Plantilla, siendo de utilidad solamente la diferencia de amplitud entre las coordenadas y no los valores en el eje.

Finalmente, el rango total de movimiento del speckle se calcula como la suma de los valores en los ejes x e y . En la *figura 3.12* se observa la tendencia proporcional del speckle a aumentar su movimiento cuando el flujo dentro del tubo es mayor.

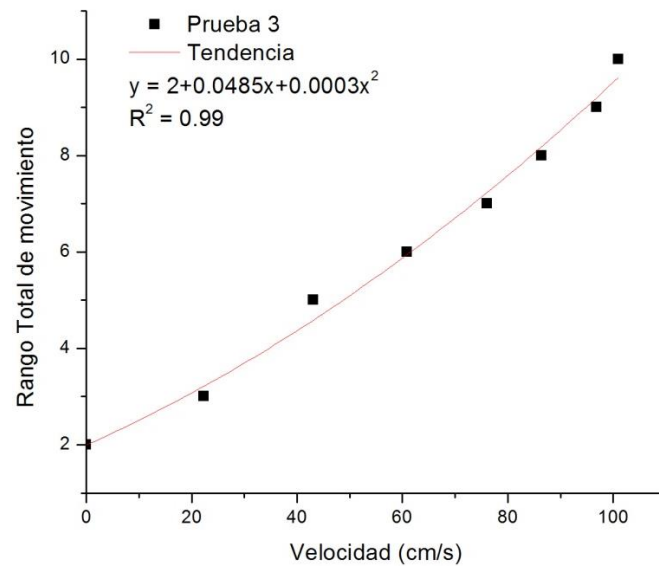


Figura 3.12 Rango de movimiento del speckle vs Velocidad, ejemplo prueba 3, configuración 2.

3.3 Validación del método

Las pruebas de validación son el proceso de revisión que verifica que los descriptores de la actividad de los patrones de speckle dinámico utilizados logran medir la velocidad de flujo. Para ello se compararon los resultados obtenidos por el método propuesto con los adquiridos haciendo uso del medidor de caudal DRH L442 con AUF 1001 tipo rotativo, como el ilustrado en la *figura 3.14*.



Figura 3.13 Medidor de caudal tipo Rotativo DRH L442 con AUF 1001

Este medidor de caudal trabaja bajo el principio de paleta giratoria. Un magneto acoplado a la paleta y herméticamente sellado del medio, transmite el movimiento giratorio a un sensor; este sensor convierte el movimiento giratorio, que es proporcional al caudal en una señal de corriente eléctrica en el estándar de 4 a 20mA, con una precisión de $\pm 2.5\%$. Una unidad electrónica adicional convierte esta señal a una salida digital para su posterior despliegue [5].

REFERENCIAS

- [1] Kjell J. Gasvik., Optical Metrology, John Wiley and song, third edition, 2002.
- [2] Escalera, A., Visión por Computador: Fundamentos y Métodos, Pearson 2001.
- [3] Pajares, G., Cruz, J.M., Visión por computador, Ra-Ma, 2001.
- [4] Briers, J., et al. Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow. Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program. Wroclaw (2006). 328-332.
- [5] Kobold. Rotating Vane Flow Meter. 2006.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Calibración del Fluxómetro de referencia

Antes de utilizar el sensor DRH L442 con AUF 1001 se debe realizar un procedimiento de calibración que garantice su adecuado funcionamiento. El procedimiento a seguir está estipulado en la hoja de datos del fabricante y es el siguiente: fue calibrado mediante dos pruebas, tomando cinco volúmenes conocidos que circulaban a través del sensor y midiendo el tiempo que tardaban en pasar. Para cada prueba se tomaron cinco datos y se promediaron. A continuación se muestra una tabla con los resultados de la calibración.

Tabla 4.1 Resultados de la calibración del Medidor de flujo.

FLUJO (ml/s)	CORRIENTE (mA)
4,99	4,58
9,32	6,07
12,32	6,83
15,17	7,88
22,66	9,96
31,50	13,04
41,29	16,16
45,87	18,30

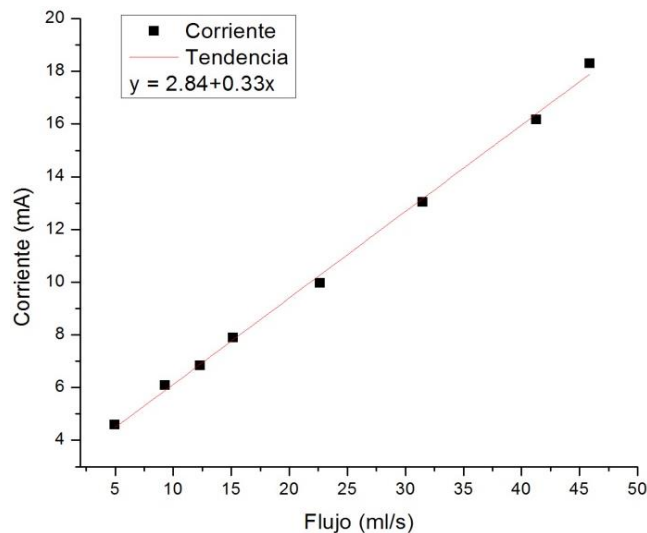


Figura 4.1 Datos para la calibración del Medidor de flujo.

La recta obtenida se ajusta a la ecuación:

$$Q = 2.84 + 0.33i \quad (4.1)$$

donde i es el valor de corriente, en mA, mostrado por el sensor y Q es el flujo de agua, en m^3/s , que circula por la tubería.

Con ayuda de la ecuación 2.28 se puede calcular la velocidad, en m/s, a partir del flujo, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$v = (2.84 + 0.33i)/A \quad (4.2)$$

siendo A el área del tubo. En este caso, el tubo tenía un diámetro interno igual 15.2mm, para un área $A = 1,8146\text{cm}^2$

El cálculo de la velocidad mediante la fórmula 4.2 y los datos entregados por el sensor sirven para corroborar los valores de velocidad medidos en cada una de las pruebas realizadas.

4.2 Aplicación de los algoritmos de análisis

4.2.1 Contraste

Configuración 1

Se realizaron pruebas de contraste con imágenes sin promediar y promediadas. Con estas últimas, se realizó una prueba para comprobar cuál era el número de imágenes que debían formar una imagen promediada. Este análisis previo se hizo con promedios de tres, cinco y diez imágenes. A continuación se presentan los resultados de la prueba 1, sin promedio y con promedio, para la configuración 1.

Tabla 4.2 Resultados de contraste Prueba 1, Configuración 1.

Velocidad (cm/s)	Contraste sin promedio	Contraste con promedio (10)
0	20,3	19,3
26,5	20,5	19,0
55,7	21,0	18,8
73,8	20,4	17,8
84,9	20,6	17,9
96,4	19,6	17,4
103,1	19,6	16,9

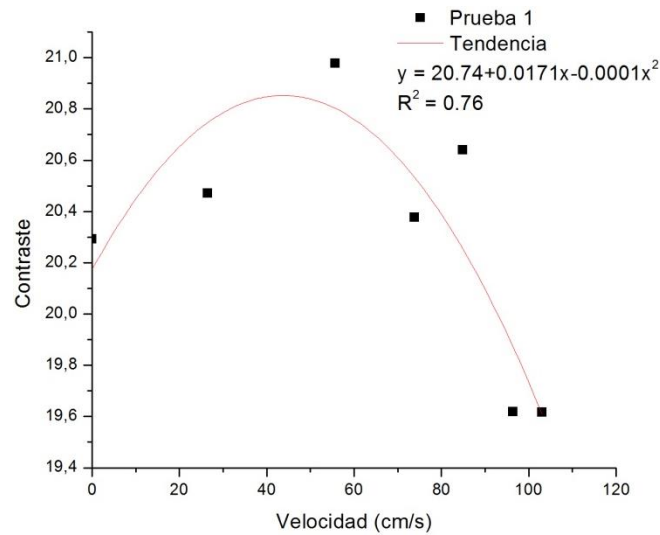


Figura 4.2 Contraste sin promedio vs Velocidad. Prueba 1, configuración 1.

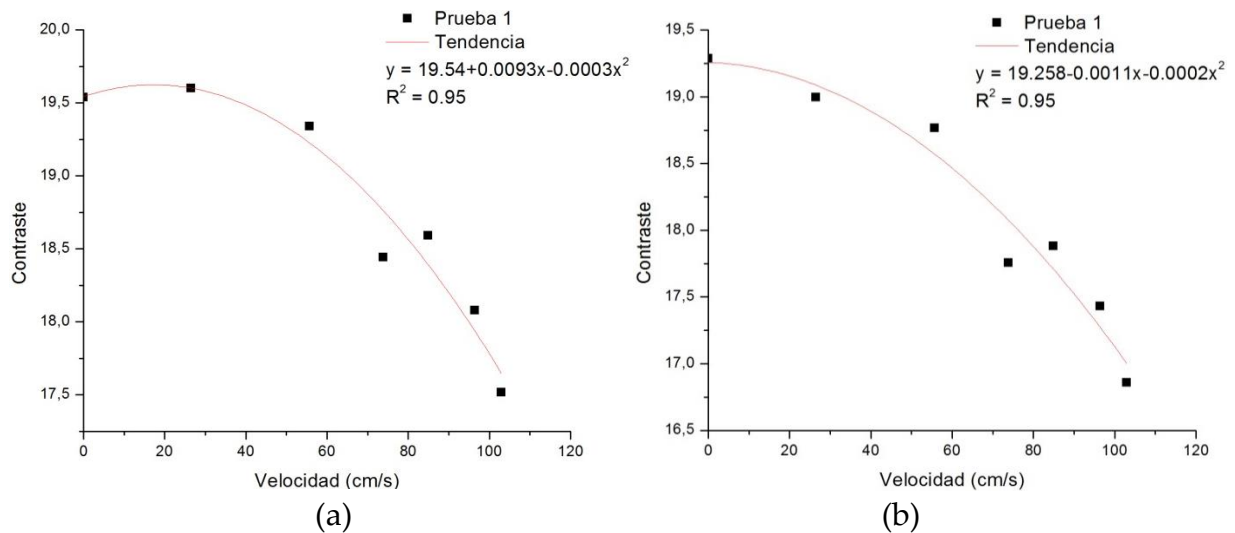


Figura 4.3 Contraste con imágenes promediadas vs Velocidad, a) 3 Imágenes promediadas, b) 10 Imágenes promediadas. Prueba 1, configuración 1.

Los valores dispersos de contraste en la *figura 4.2*, indican que la prueba de contraste para imágenes sin promediar no es un método apropiado para la determinación de la velocidad de flujo. Dichas fluctuaciones se deben a la baja sensibilidad del algoritmo para pequeños valores de velocidad, a diferencia de la alta sensibilidad que presenta al ruido.

En la *figura 4.3* se puede ver como los resultados obtenidos con las imágenes promediadas presentan un mejor ajuste a la curva de tendencia. Experimentalmente se encontró que el promedio de diez imágenes es el más adecuado, puesto que presenta más sensibilidad para pequeños valores de velocidad. Debido a esto, los siguientes resultados de contraste se lograron con promedios de conjuntos de diez imágenes.

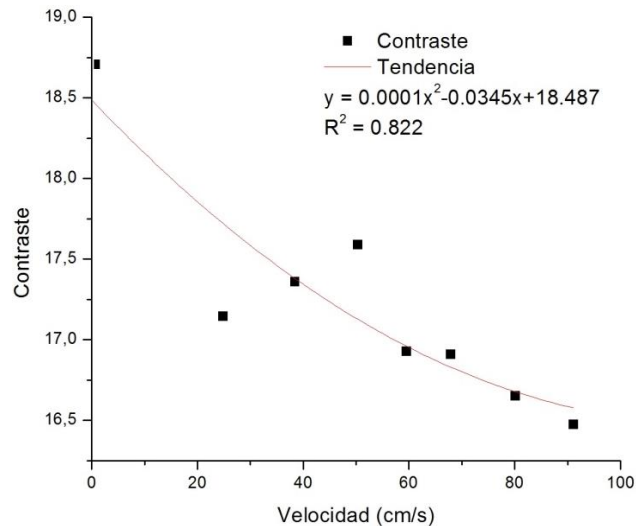


Figura 4.4 Contraste vs Velocidad. Prueba 2, configuración 1.

Los resultados de la prueba 2 se presentan en la *figura 4.4*. Se observa que presentan una considerable diferencia respecto a los anteriores valores, la tendencia de disminuir el valor de contraste con el aumento de la velocidad se mantiene, pero la pendiente ha cambiado su concavidad. Debido a esto se concluyó que la aplicación de este método no es apropiada para esta configuración del sistema de flujo.

Configuración 2

Con esta configuración se realizaron 4 pruebas, cada una a diferentes distancias a lo largo del tubo como se puede ver en la *figura 4.5*; esto con el fin de identificar diferencias cuando se mide en distintas posiciones a lo largo del tubo. La primera prueba se tomó a 47cm de uno de los extremos; las pruebas siguientes a 60cm, 75cm y 85cm respectivamente. En la *figura 4.6* se presentan los resultados obtenidos para las pruebas a 75cm y 85cm.

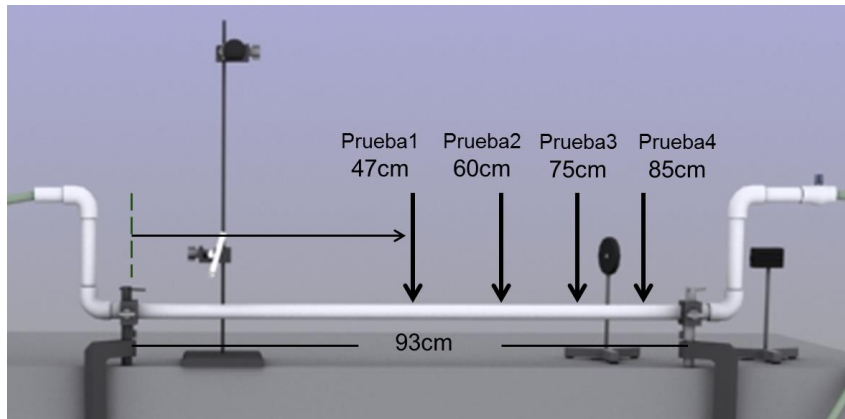


Figura 4.5 Distancias de medición con la configuración 2.

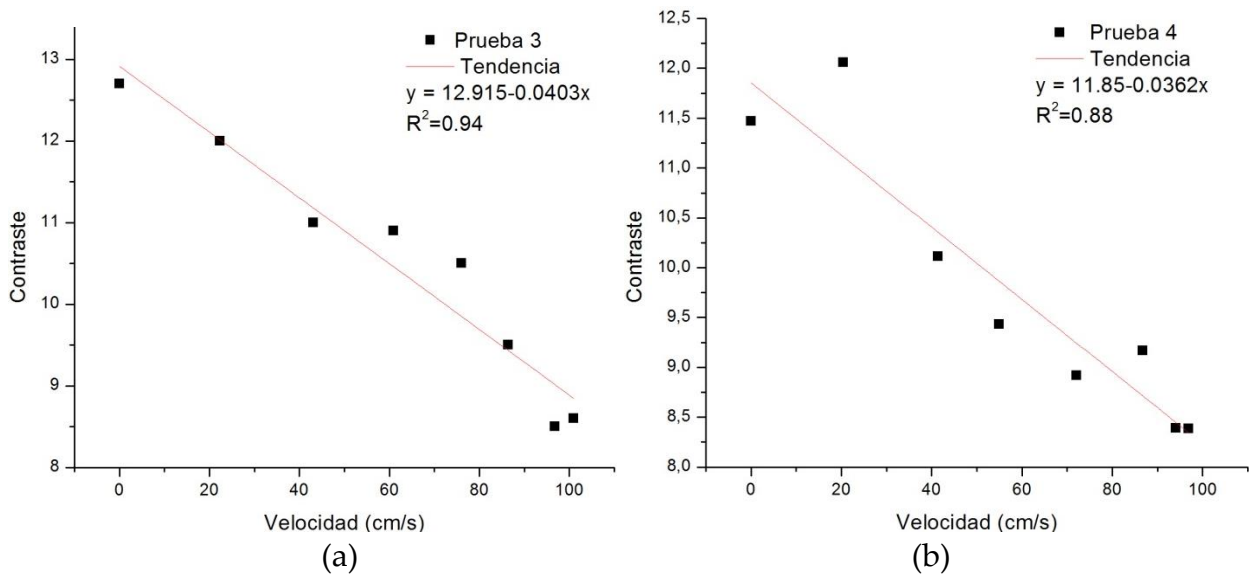


Figura 4.6 Contraste vs Velocidad, a) Prueba 3, b) Prueba 4, configuración 2.

Configuración 3

Para esta configuración se realizaron dos pruebas, a 10 y 17 cm del punto desde donde se sujetó la tubería, quedando ubicados en la parte media y extrema, respectivamente.

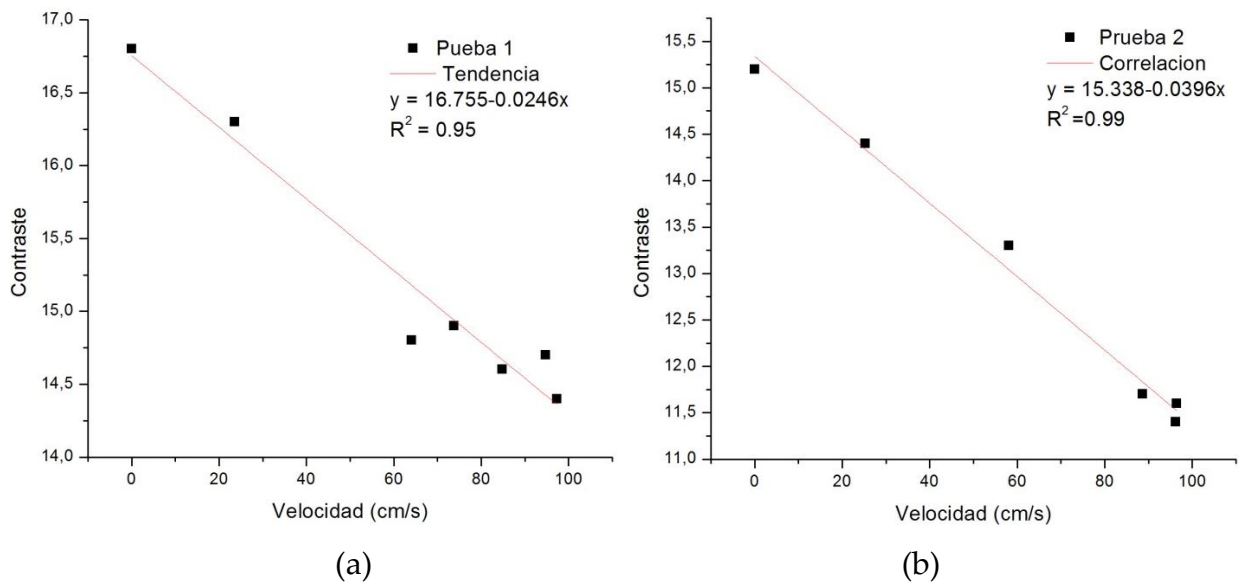


Figura 4.7 Contraste vs flujo, a) Prueba 1, b) Prueba 2, configuración 3.

Configuración 4

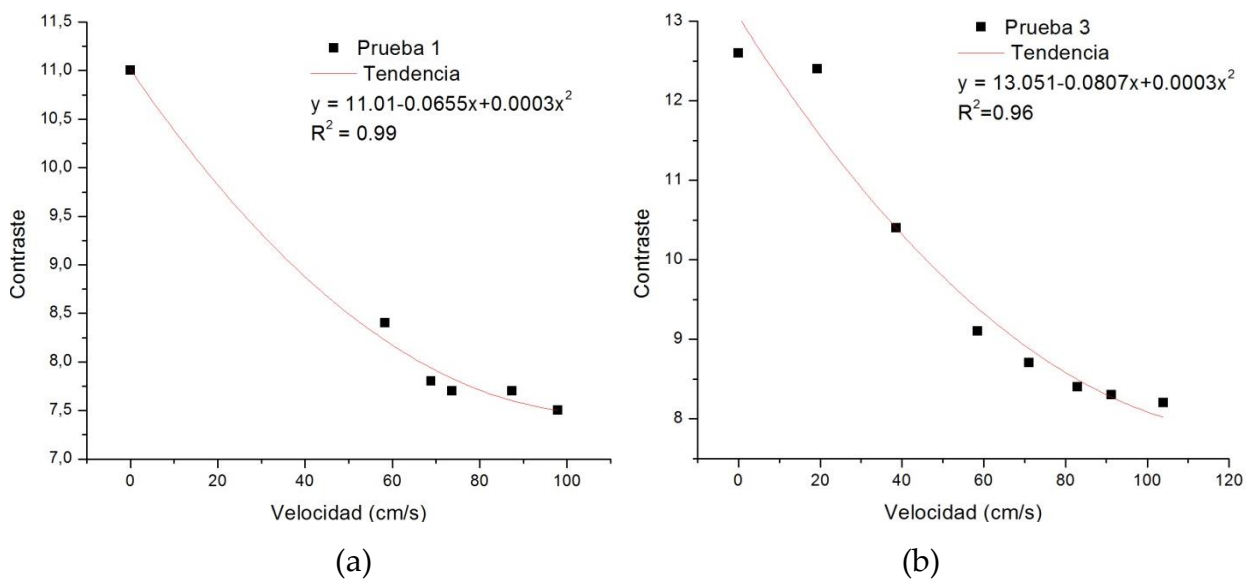


Figura 4.8 Contraste vs Velocidad, a) Prueba 1, b) Prueba 3, configuración 4.

El estudio de contraste arrojó resultados promisorios para las configuraciones 2, 3 y 4, donde los valores se ajustaron bien a su respectiva curva de tendencia. Sin embargo, la pendiente de la recta a la que se ajustan varía de forma considerable de una configuración a otra. Por este motivo se descartó este método y fue necesario considerar el uso de otro algoritmo para la determinación de la velocidad.

4.2.2 Correlación

Para el análisis de correlación se implementó la ecuación 2.28 aplicada a grupos consecutivos de imágenes promediadas. A continuación se presentan los resultados para las configuraciones 3 y 4 con grupos de diez imágenes promediadas.

Configuración 3

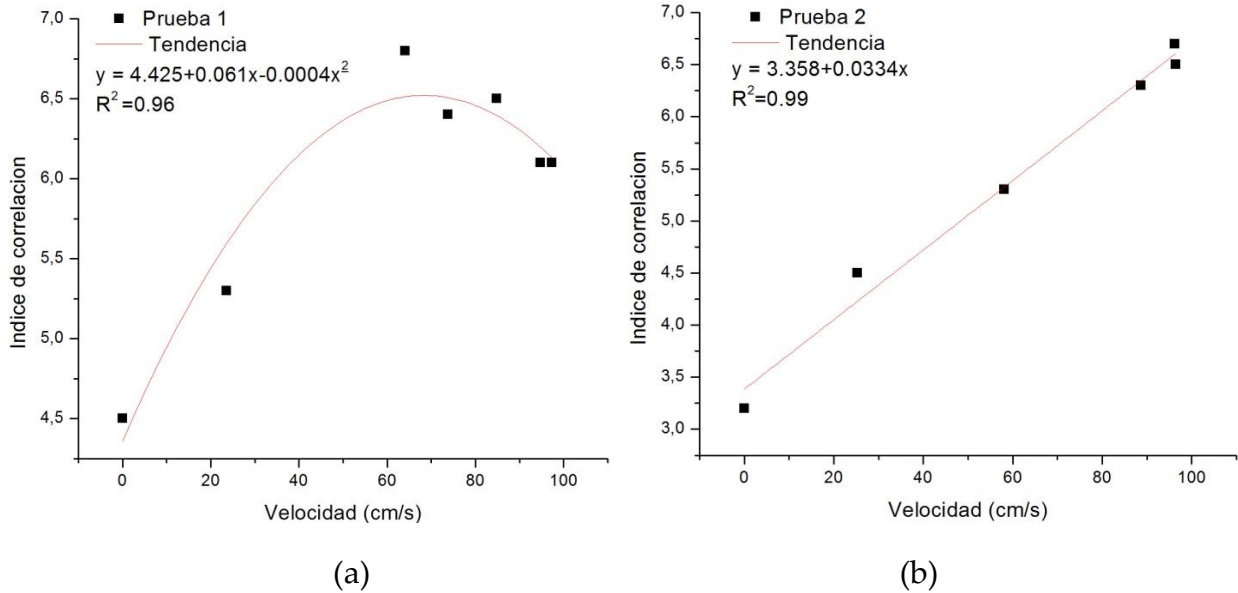


Figura 4.9 Índice de Correlación vs Velocidad, a) Prueba 1, b) Prueba 2, configuración 3.

Configuración 4

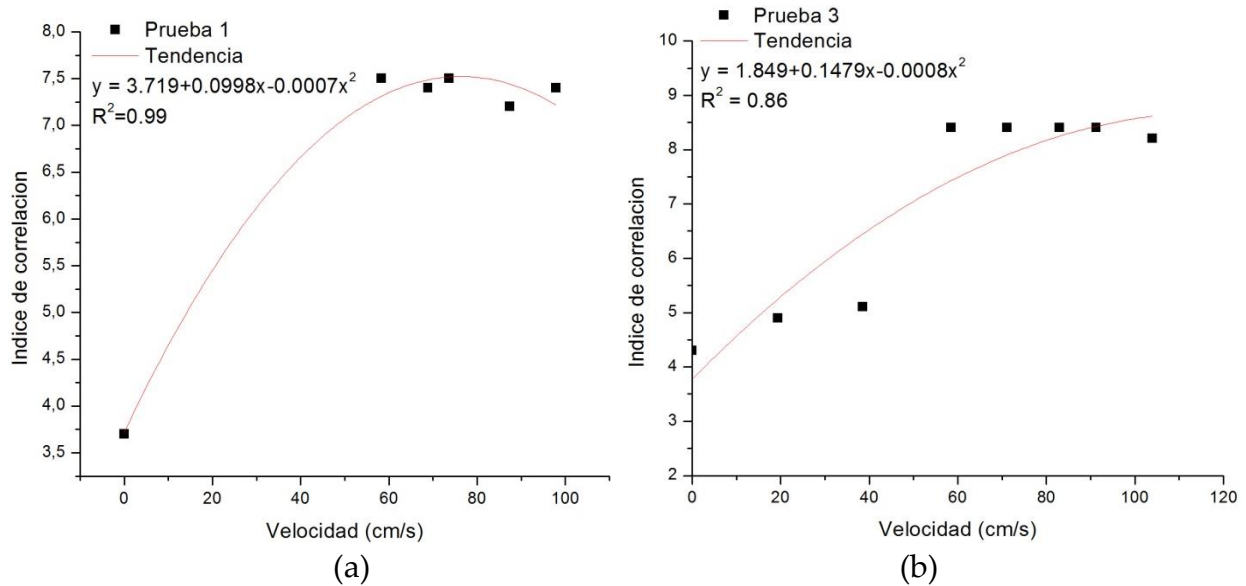


Figura 4.10 Índice de Correlación vs Velocidad, a) Prueba 1, b) Prueba 3, configuración 4.

Las *figuras 4.9 y 4.10*, correspondientes a las configuraciones 3 y 4, representan también los resultados obtenidos para las configuraciones 1 y 2. Se puede observar que el descriptor de correlación no es concluyente para ninguna configuración, porque no hay una tendencia marcada ni siquiera para pruebas realizadas bajo una misma configuración.

Este comportamiento se puede explicar debido a que el fenómeno es muy rápido y en el momento de adquisición de datos puede haber submuestreo temporal. Además, existen otros efectos como las perturbaciones externas provenientes del flujo discontinuo de la fuente, las variaciones en la intensidad de la luz láser, las fluctuaciones en el sensor de la cámara, entre otras, que afectan aleatoriamente el patrón e influyen negativamente en el análisis debido a la sensibilidad del descriptor.

4.2.3 Análisis de rango de movimiento

Configuración 1

Tabla 4.3 Resultado análisis de rango de movimiento del speckle con la configuración 1.

Velocidad (cm/s)	Rango de movimiento		Rango Total
	Eje x	Eje y	
0	1	1	2
27	1	1	2
56	2	2	4
74	3	3	6
85	3	4	7
96	3	5	8
103	2	6	8

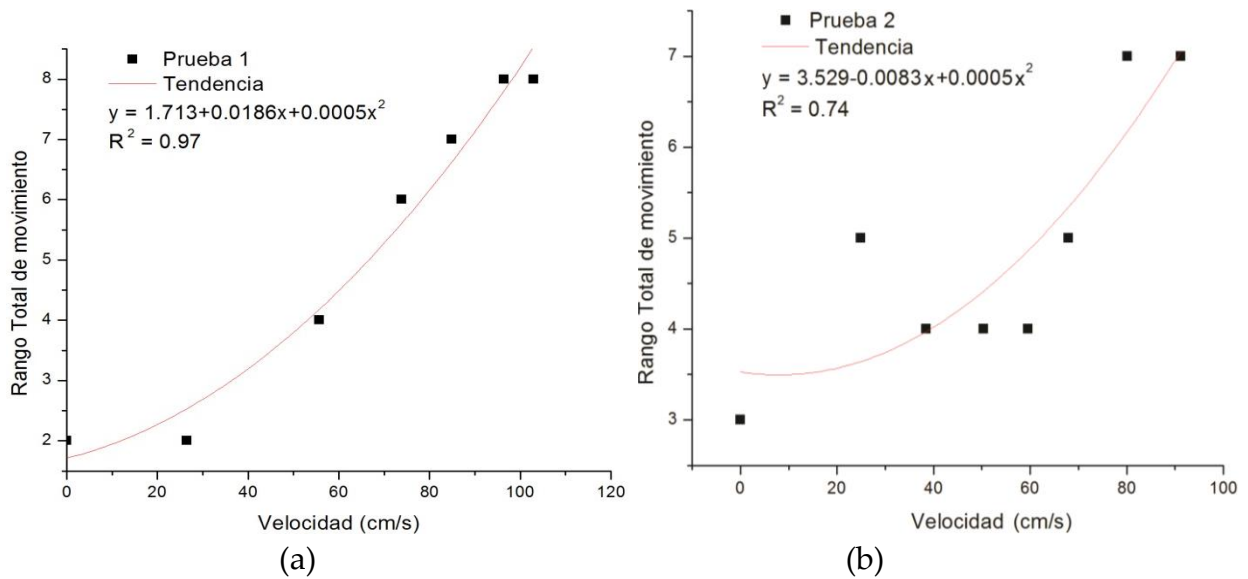


Figura 4.11 Rango de movimiento del speckle vs Velocidad; a) Prueba 1, b) Prueba 2, configuración 1.

En el primero de los gráficos de la *figura 4.11* se observa una proporcionalidad cuadrática entre el movimiento del speckle y la velocidad del fluido, es decir, que el movimiento del speckle se hace mayor a medida que las perturbaciones en la tubería se incrementan como respuesta al aumento del flujo. En el segundo gráfico, aunque la tendencia es la misma, hay valores muy dispersos y existen valores que se mantienen iguales para diferentes valores de flujo. Este comportamiento puede haber sido ocasionado por la presencia de burbujas o fluctuaciones en el caudal del fluido, sin embargo la inconsistencia se presentó para los valores centrales de la medida, sin afectar la tendencia.

Configuración 2

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas a las distancias mencionadas anteriormente en la *figura 4.5*.

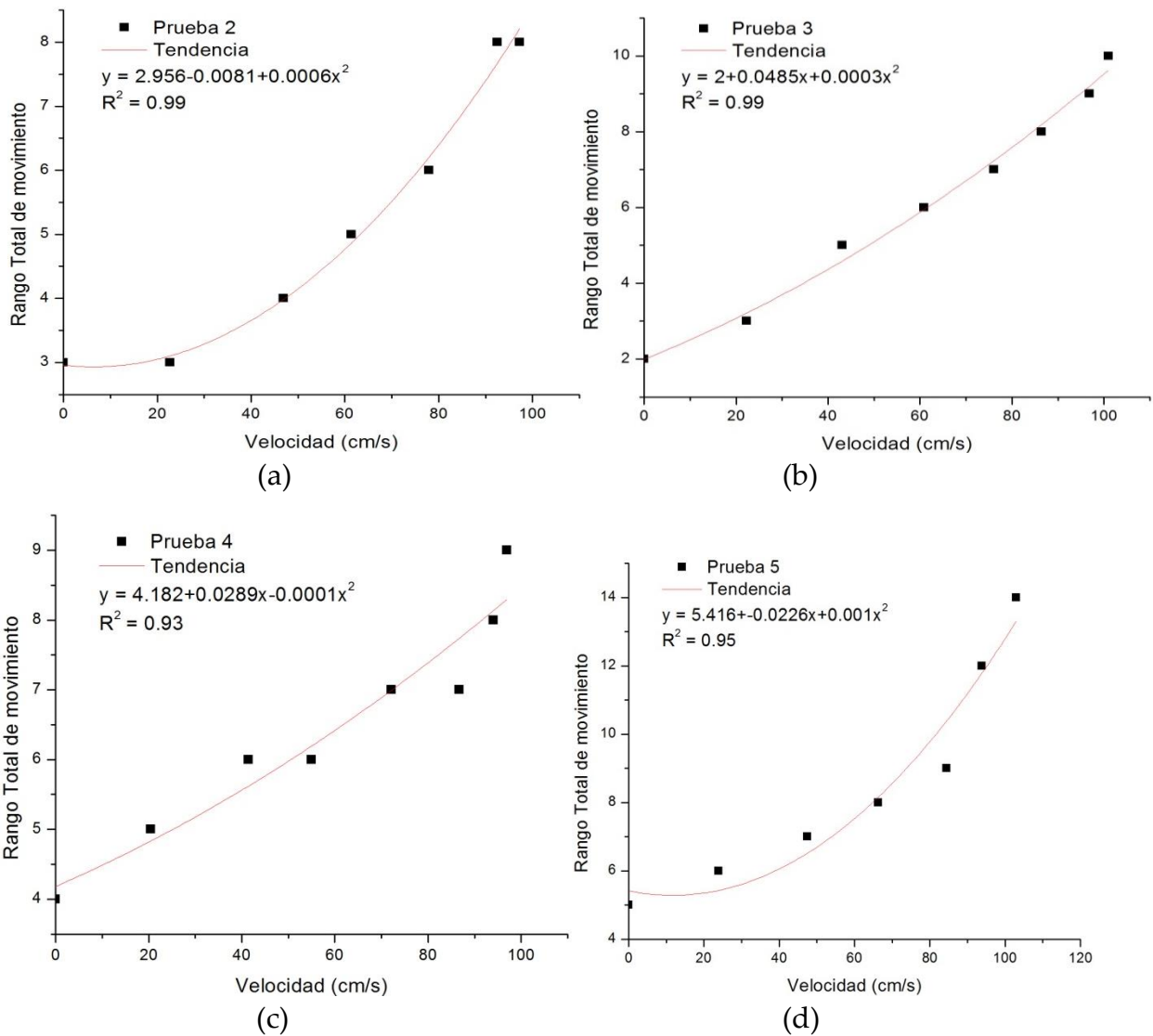


Figura 4.12 Rango Total de movimiento vs Velocidad, a) Prueba 1, b) Prueba 2, c) Prueba 3, d) Prueba 4, configuración 2.

Se obtuvieron resultados satisfactorios con todas las pruebas tomadas a 47, 60, 75 y 85 cm de uno de los extremos de la tubería. En los gráficos se puede observar una respuesta de tipo cuadrática en el movimiento del speckle ante el aumento de flujo, aunque es poco marcada en las muestras 3 y 4. También se puede notar una diferencia en el off-set de los gráficos, lo cual indica que el rango de movimiento varía a lo largo de la tubería, pero se mantiene un buen ajuste a la tendencia.

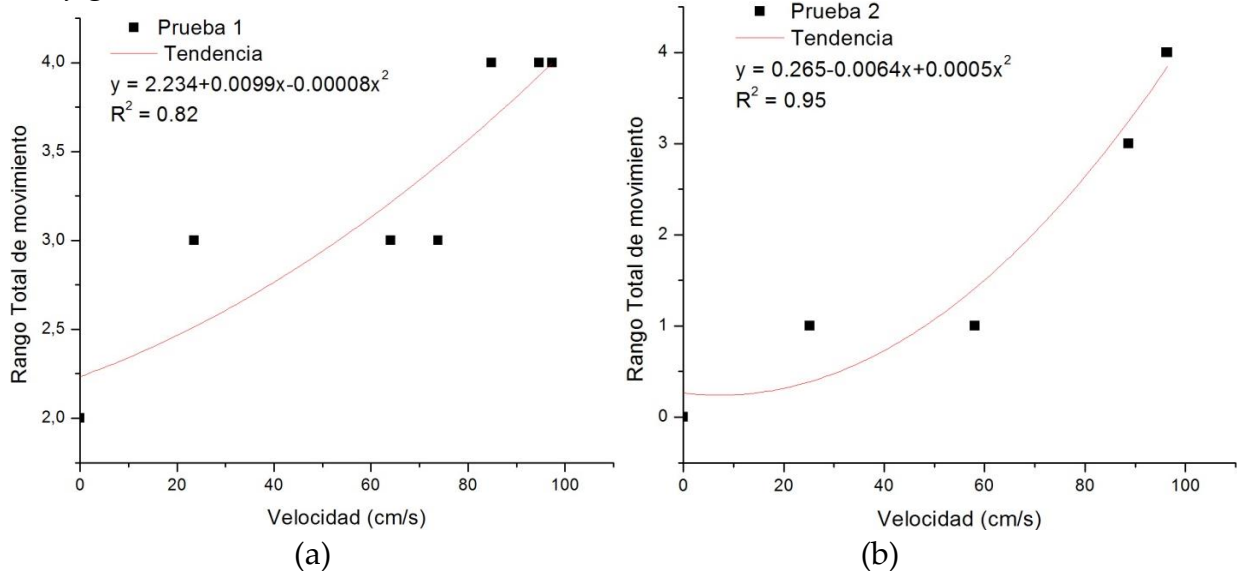
Configuración 3

Figura 4.13 Rango Total movimiento del speckle vs Velocidad, a) Prueba 1, b) Prueba 2, configuración 3.

Con esta configuración se presentó una respuesta menos uniforme en el movimiento del speckle, pero se mantiene la relación con la velocidad. De esto se extrae que la reducción de longitud en la tubería y del rango de sujeción reduce notablemente la sensibilidad de la técnica respecto a lo logrado con las configuraciones 1 y 2. Aumentar la sensibilidad con esta configuración, requeriría de una cámara con mayor resolución, capaz de captar menores rangos de movimiento y también una mayor velocidad en la captura de las imágenes.

Configuración 4

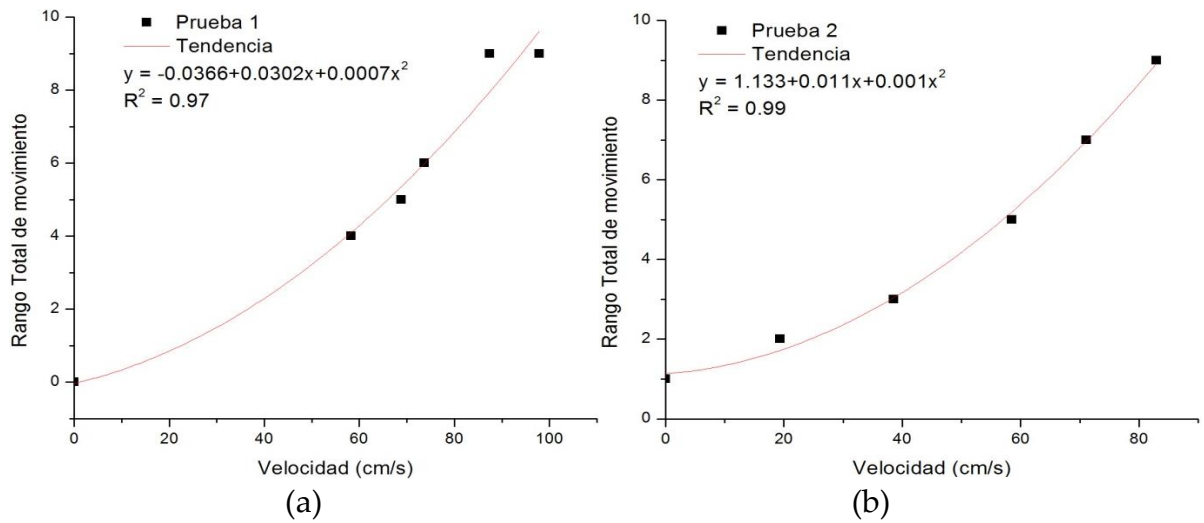


Figura 4.14 Rango de movimiento del speckle vs Velocidad en la tubería, a) Prueba 1, b) Prueba 2, configuración 4.

Los gráficos obtenidos con esta nueva fuente de alimentación presentan mayor uniformidad, aunque se debió elegir un momento adecuado para la grabación de las imágenes, ya que por momentos la fuente de agua contenía burbujas de aire que no se podían eliminar.

En la mayoría de los resultados de las configuraciones 1, 2 y 3 hay un valor inicial de movimiento cuando el flujo es cero, este dato fue tomado con la motobomba en funcionamiento, pero sin flujo en la sección de interés, para esto se desvió el fluido por un sistema de circulación alternativo, pero sin desconectar la bomba eléctrica del tubo donde se toman las muestras, como se resalta en la *figura 4.15*.

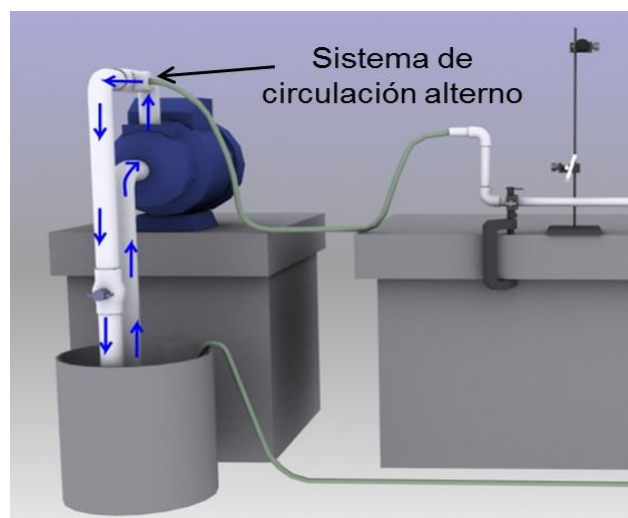


Figura 4.15 Sistema de circulación alternativo.

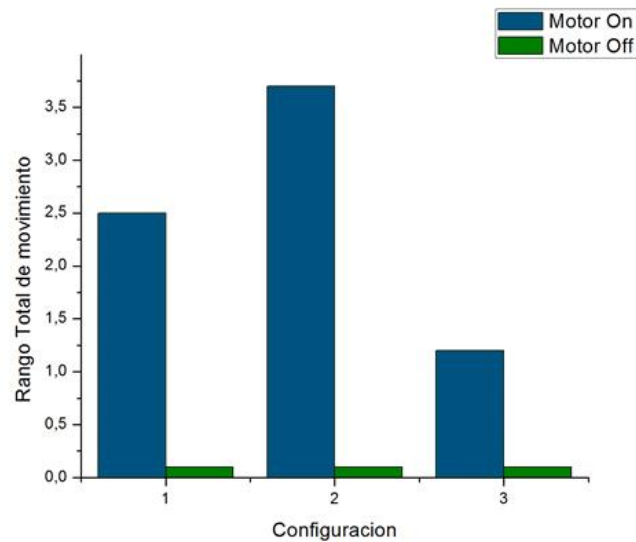
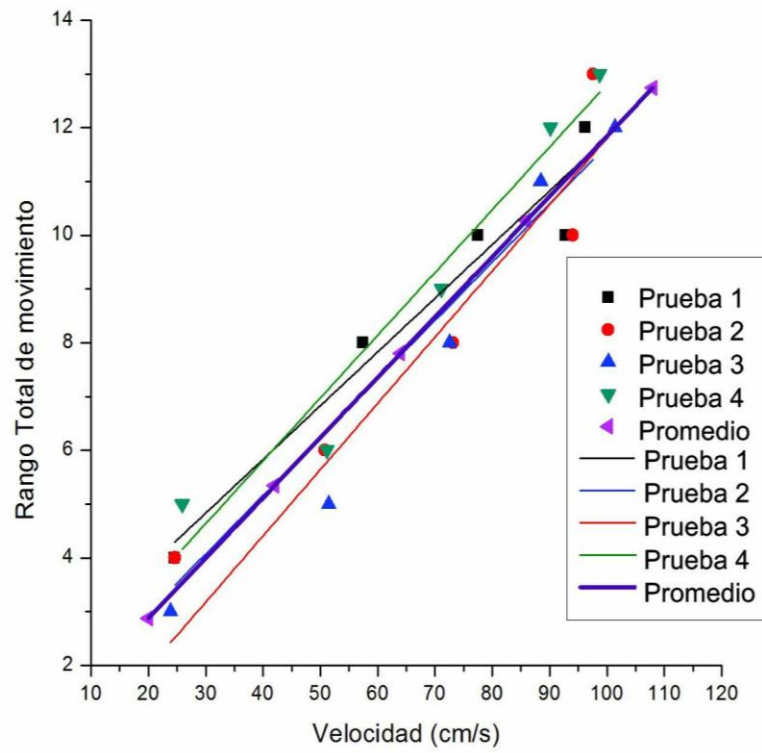


Figura 4.16 Rango de movimiento producido por la vibración de la bomba eléctrica.

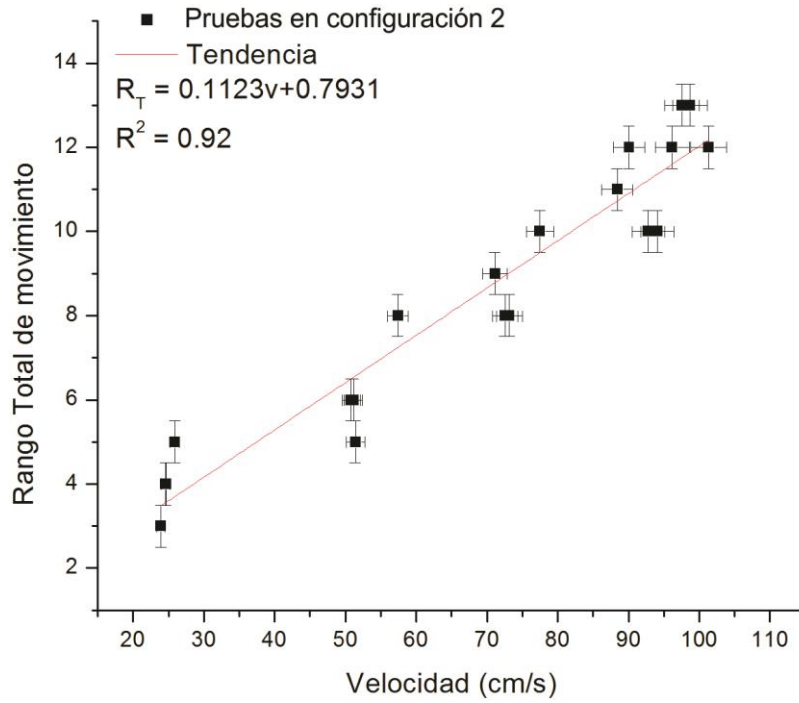
En la *figura 4.16* se compara el rango de movimiento producido por la bomba eléctrica encendida y apagada (sin flujo en la tubería principal en ninguno de los casos). Los resultados confirman que los valores iniciales se deben a ruido introducido por la motobomba, ya que para un flujo nulo y la motobomba apagada, el rango de movimiento siempre fue igual a cero en las pruebas realizadas, para todas las configuraciones.

Validación de la velocidad

Con el propósito de evaluar el sistema implementado se realizaron pruebas con la configuración y el método que mejores resultados arrojó, es decir, la configuración 2 tomada a 47cm del extremo del tubo y analizando mediante el algoritmo de rango de movimiento. A continuación se presentan los resultados obtenidos, en los cuales no se tuvo en cuenta los datos a bajas velocidades de flujo debido a que el ruido introducido por la motobomba se hace relevante para estos valores.



(a)



(b)

Figura 4.17 Rango de movimiento vs velocidad, configuración 2.

Existe una tendencia similar en los resultados de las pruebas mostrados en la *figura 4.17*, donde se observa una relación lineal entre la velocidad de flujo y el rango de movimiento de los patrones de speckle. Los valores se ajustan a una tendencia lineal (línea promedio en color violeta en la *figura 4.17a*), este comportamiento se obtiene una vez se han despreciado los valores iniciales de la velocidad.

La regresión lineal de los valores obtenidos presentó un ajuste del 92.1% y es descrita por la ecuación:

$$R_T = 0.1121v + 0.6317 \quad (4.3)$$

donde R_T es el rango total de movimiento y v la velocidad de flujo.

Finalmente, se puede decir sobre los tres tipos de métodos de análisis de speckle dinámico implementados, que el análisis del rango de movimiento fue el que mejores resultados presentó. La marcada tendencia de los datos y la repetitividad de los mismos, muestra que este es un método que podría ser utilizado para la medición de la velocidad en fluidos que circulan al interior de una tubería opaca. Aun así, hay aspectos que se deben mejorar, como la resolución del sistema, realizar pruebas con distintos tipos de fluidos y en ambientes mucho más controlados. Los resultados de contraste también fueron satisfactorios puesto que presentaron datos ajustados a una tendencia que los describe, pero que no se mantuvo constante bajo situaciones similares, posiblemente debido a su baja sensibilidad en los rangos de velocidad trabajados.

En cuanto al estudio de correlación del speckle, los resultados obtenidos no fueron adecuados debido a la sensibilidad a interferencias del método, los cuales fueron considerablemente frecuentes. Antes de descartar definitivamente el método de correlación para esta aplicación, es necesario realizar pruebas en un entorno más controlado.

Existen errores comunes en los métodos aplicados. Algunos de ellos se pueden minimizar con el uso de equipos más sofisticados, el primero de ellos es la inconstancia de velocidad en el flujo de las fuentes usadas y las perturbaciones propias del motor en la bomba eléctrica, que se pueden corregir utilizando un sistema de control de flujo y aislando la motobomba del punto de medida, mediante una manguera, una distancia considerable. Del dispositivo de captura de las imágenes también depende en gran medida la calidad de los datos. Respecto a este se puede mejorar su resolución, sensibilidad y tiempo de captura utilizando una cámara profesional.

También se produjeron variaciones esporádicas en la potencia de iluminación entregada por el láser, las cuales se podrían reducir con la utilización de un láser de mayor estabilidad. Otros tipos de errores persistentes y de los cuales no se puede prescindir, son los tipos de ruido aleatorios que afectan a los sensores de intensidad en la cámara y la naturaleza aleatoria del fenómeno speckle.

CONCLUSIONES

- El software implementado permitió la correcta aplicación de los algoritmos propuestos y la comparación de cada uno de ellos. Por otra parte, brindó la posibilidad, en el caso del estudio de correlación y contraste, de visualizar los resultados en tiempo real, lo cual resultó de utilidad para realizar cambios en el sistema y lograr una mejor configuración. Dicho software puede configurarse rápidamente para realzar las características del speckle necesarias para cada tipo de análisis.
- Se identificaron los requerimientos necesarios para lograr una mejor extracción de los descriptores de los patrones de speckle generados por la dinámica del fluido. Gracias a esto se logró establecer un protocolo que permite reproducir las condiciones necesarias para la correcta utilización del sistema.
- De los algoritmos implementados, el rango de movimiento del speckle ofreció los mejores resultados, ya que describe de forma más precisa su comportamiento en la mayoría de los casos de estudio, aunque su proceso puede resultar más laborioso. El análisis de contraste ofreció resultados que siguen una tendencia, aunque su precisión puede ser menor. En cuanto al estudio de correlación, ésta no ofrece resultados estables para la mayoría de configuraciones debido a su alta sensibilidad al ruido en el sistema.
- El diseño e implementación del sistema para la medición de flujo en tuberías, permitió obtener resultados satisfactorios en la determinación de la velocidad de flujo, así mismo, facilitó el estudio de diferentes configuraciones que se pueden presentar en un escenario real.
- El estudio realizado permite concluir que el sistema implementado puede ser utilizado para determinar la velocidad de flujo, además es de fácil implementación, sus requerimientos son mínimos, es relativamente económico, es un método no invasivo y de medición casi inmediata. Por lo que se puede especular que la técnica de speckle utilizada es apropiada para la medición de cambios de velocidad y se puede utilizar como base para determinar otros parámetros más complejos en fluidos.

RECOMENDACIONES FUTURAS

Al ser un proyecto pionero en la medición de velocidad de flujo en tubos opacos, los resultados obtenidos en esta investigación pueden sugerir una continuación en los estudios de esta técnica. Para la ejecución de trabajos futuros se recomienda:

1. Realizar una mayor cantidad de pruebas con el fin de validar la técnica de tal manera que posteriormente se pueda diseñar un sensor.
2. Identificar las condiciones que se deben cumplir para obtener una medida precisa de velocidad, tratando de minimizar los factores externos, como por ejemplo realizando pruebas con una bomba eléctrica a mayor distancia de donde se toman las medidas de speckle o hacer uso de una bomba eléctrica con control de estabilidad. En cuanto al sistema de captura, se puede hacer uso de cámaras con tecnología CCD para aumentar la sensibilidad y reducir el ruido en las imágenes. Todo esto con el fin de eliminar las perturbaciones inherentes del sistema.
3. Implementar un sistema automatizado que permita mantener constante los niveles de intensidad y la velocidad de captura de las imágenes.
4. Analizar el efecto con varios puntos de luz láser en vez de un solo haz extendido para observar cómo se alteran los patrones en cada una de las configuraciones usadas.
5. Buscar otros tipos de descriptores, que permitan caracterizar las variaciones de velocidad en el estudio de patrones de speckle con el fin de mejorar los resultados obtenidos.

Anexo 1: Comparación de características de los medidores de caudal

En la tabla se muestran las características resumidas de los instrumentos medidores de caudal