

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Validación experimental del efecto de la longitud y del ángulo del cono de un inyector de turbina Pelton en la distorsión del chorro

Elkin Humberto Arias Rojas

Yankarlo Quintero Carreño

Ingeniería Electromecánica

Ing. MSc. Jorge Andrés Sierra Del Rio

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

04/08/2022

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Esta investigación experimental se centra en el diseño, fabricación y montaje de un inyector de turbina Pelton para determinar la distorsión del chorro, para conocer su geometría y apertura de cono determinando la distancia óptima donde se genera mayor eficiencia al impactar con el cangilón. Para este trabajo se diseña un dispositivo de medición el cual permite conocer dicha geometría al entrar en contacto con la capa superficial del chorro. Para llevar a cabo esta investigación se hace uso del banco de pruebas del laboratorio de modelado y prototipos del ITM parque i, obteniendo gráficas en las cuales se identifica la distorsión radial y longitudinal del chorro. Del estudio se encuentra que a medida que aumenta la distancia de medición el chorro este tiende a deformarse, en conclusión, se puede afirmar que, a mayor distancia a partir de la salida del inyector, mayor es la deformación generando una geometría irregular, lo que se puede entender como menor eficiencia en este tipo de máquinas generadoras de energía.

Palabras clave: Inyector, Distorsión, Medición, Turbina Pelton, Experimental.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Dedicamos este trabajo de grado principalmente a Dios, que ha sido nuestro mayor respaldo, guía y fortaleza en la vida; por mantenernos firmes en los momentos difíciles y hoy permitirnos celebrar junto a nuestros seres amados este gran logro de nuestra formación profesional.

Agradecemos con amor especial a nuestras familias, que durante todo este tiempo nos han demostrado su apoyo, cariño, comprensión; quienes nos inculcaron el mejor ejemplo de esfuerzo, dedicación, valentía y que hoy celebran este triunfo como si fuera propio.

Al Ingeniero Magister Jorge Andrés Sierra del Rio por su valiosa guía y asesoramiento durante la elaboración de este proyecto, su compañía, comprensión y su indiscutible compromiso durante este tiempo.

De igual manera nuestros agradecimientos al Instituto Tecnológico Metropolitano y a nuestros profesores, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que podamos ser profesionales íntegros y que aporten al crecimiento individual y de nuestro país.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

LDA: Anemometría Laser Doppler.

LDV: Velocimetría Laser Doppler.

3D: Tres dimensiones, (hace alusión a un objeto o espacio que tiene ancho, altura y profundidad).

PVC: Policloruro de vinilo.

mm: Milímetros.

": Pulgadas.

°: Grados Geométricos.

PLA: Acido Poliláctico.

CNC: Control numérico computarizado.

CFD: Dinámica de fluidos computacional.

%: Porcentaje.

Hz: Hertz.

V (m³): Volumen (metros cúbicos).

T (s): Tiempo (segundos).

Q (m³/s): Caudal.

S = distancia en mm con respecto a la salida del inyector.

d1 = diámetro de salida del inyector.

MPa: Mega pascales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivos	9
1.2. Estructura del documento.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Estado del arte:.....	12
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Diseño del dispositivo de medición de la distorsión del chorro.	15
3.2. Fabricación del conjunto inyector – dispositivo de medición.	18
1.3. Desarrollo de las pruebas experimentales:.....	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	38
REFERENCIAS	40
APÉNDICE.....	42
Apéndice A: Aguja 60°	42
Apéndice B: Aguja 75°	42
Apéndice C: Boquerel	43
Apéndice D: Soporte circular interior.....	43
Apéndice E: Anillo guía	44
Apéndice F: Anillo base.....	44
Apéndice G: Anillo medidor de ángulos	45
Apéndice H: Barra guía desplazamiento	45

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivo de medición por contacto. Imagen tomada de (R Fiereder, 2010)	16
Figura 2. Dispositivo de medición laser. Imagen tomada de (Thomas Staubli, 2009)	16
Figura 3. Diseño 3D de las piezas del dispositivo de medición. A) Anillo guía, B) Anillo base, C) barra guía desplazamiento, D) Anillo medidor de ángulos.....	17
Figura 4. Dispositivo de medición de distorsión del chorro fabricado. A) Vista inferior, B) Vista frontal, C) Vista superior.....	18
Figura 5. Ensamble del inyector	23
Figura 6. Conjunto inyector – elemento de medición del banco de pruebas.....	24
Figura 7. Esquema simbólico del banco de pruebas ITM parque i.	25
Figura 8. Esquema del montaje (A) inyector, (B) bomba de inyección, (C) bomba de recirculación, implementado en el banco hidráulico de pruebas ITM parque i.	26
Figura 9. Puntos de referencia de los datos obtenidos.....	27
Figura 10. Porcentajes de apertura de la aguja A) Mínimo (0%), B) Máximo (100%).	28

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Prototipado de inyector de turbina Pelton.	19
Tabla 2. Parámetros de configuración de los experimentos realizados.	27
Tabla 3. Presión obtenida según % apertura del inyector y la frecuencia de operación de la bomba.....	29
Tabla 4. Caudal medido en el banco de pruebas a diferente frecuencia en la bomba instalada.	29
Tabla 5. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 60°, 100% de apertura y 0,002425 m ³ /s.....	30
Tabla 6. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 60°, Apertura 100% y 0,007276 m ³ /s.	31
Tabla 7. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 60°, Apertura 100% y 0,009463 m ³ /s.	32
Tabla 8. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 75°, Apertura 100% y 0,002425 m ³ /s.	33
Tabla 9. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 75°, Apertura 100% y 0,007276 m ³ /s.	34
Tabla 10. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la Figura 9 , aguja de 75°, Apertura 100% y 0,009463 m ³ /s.	35
Tabla 11: Comparacion de resultados de la distorsion radial del chorro.	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diferentes métodos de generación de energía, de los cuales muchos de ellos son poco amigables con el medio ambiente debido a la contaminación que producen, por lo tanto, se han direccionado los esfuerzos en la implementación de nuevos métodos alternativos renovables, entre los cuales se cuentan con fuentes de energía hidráulica, las cuales aprovechan la energía, tanto cinética como potencial presente en el agua. Entre las diferentes tecnologías se destacan las turbinas Pelton debido a su alta eficiencia, bajo consumo de agua y bajo costo nivelado de la energía (LCOE por sus siglas en inglés), si bien es una tecnología de alta eficiencia, aun se presentan mecanismos de pérdida de energía en su funcionamiento, entre los cuales se destaca la calidad del chorro que sale del inyector, el cual presenta fenómenos de distorsión asociados principalmente a parámetros geométricos tales como el ángulo y longitud del cono de la aguja.

Si bien existen diferentes metodologías que permiten el estudio del efecto de los parámetros geométricos del inyector en la calidad del chorro, una metodología experimental permite la validación tanto de modelos analíticos como computacionales, los cuales, sin duda, son más económicos, rápidos y permiten estudiar fenómenos internos del fluido con mayor facilidad. Es por esta razón que se ha decidido realizar la validación experimental de los parámetros geométricos del inyector influenciadores en la calidad del chorro, determinando la mejor alternativa para el aprovechamiento del recurso hídrico y la generación de energía.

Este proyecto está enfocado en la ampliación del conocimiento teórico-practico, por medio de la validación experimental de uno de los mecanismos de medición de distorsión del chorro de un inyector de una turbina Pelton, el cual beneficiará a los futuros tecnólogos e ingenieros en las áreas de la investigación y el desarrollo de generación de energía, haciendo uso de los recursos de laboratorio.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.1. Objetivos

1.1.1. General

Validar experimentalmente la influencia de la longitud y del ángulo del cono de la aguja de un inyector de una turbina Pelton en la calidad del chorro.

1.1.2. Específicos

- Fabricar e implementar el conjunto inyector-dispositivo de medición que permita la validación de los parámetros geométricos seleccionados en la distorsión del chorro del inyector de la turbina Pelton.
- Diseñar a nivel de detalle un prototipo que permita la medición de los efectos de los parámetros geométricos seleccionados en la distorsión del chorro del inyector de la turbina Pelton.
- Contrastar los resultados experimentales con respecto a los resultados numéricos arrojados en estudios anteriores sobre la distorsión que se presenta en el chorro del inyector de una turbina Pelton.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2. Estructura del documento

El presente documento se encuentra elaborado como se describe a continuación:

Inicialmente se encuentra una breve descripción de la problemática, propósito, justificación y objetivos planteados en la tesis, además de la estructuración del presente documento.

A continuación, se encuentra el marco teórico, en el cual se exponen los antecedentes de la implementación, estudios, avances y pruebas experimentales realizados a lo largo del tiempo referentes al tema tratado.

Luego se puede observar cada uno de las etapas del proyecto, empezando por el diseño, en el cual se definió la forma, material, tipo de aguja, y prototipo final para su futura fabricación; a continuación se contempla la etapa de fabricación, en la cual una vez definido el prototipo se proceden a elaborar las piezas necesarias para llevar a cabo la actividad, utilizando equipos como impresoras 3D y máquinas CNC o en ocasiones el uso de elementos comerciales; por último se contempla la etapa de ensamble de cada una de las partes del inyector dando como resultado final el instrumento al cual se le realizaran las respectivas pruebas.

Después se observan los resultados de las mediciones y el análisis de los datos obtenidos en las pruebas realizadas en el laboratorio de modelación y prototipos de la universidad, además de realizar la comparación de los resultados obtenidos en análisis anteriores realizados por medio de softwares de simulación.

Y, por último, se observan las conclusiones finales de las pruebas y las recomendaciones para futuros trabajos que se desean realizar con referencia al tema tratado en el presente proyecto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Las turbinas Pelton de impulso inventadas por Lester Pelton, son las turbinas hidroeléctricas utilizadas para las aplicaciones de cabeza alta. Estas turbinas producen energía mediante la utilización del impulso de un chorro de agua de alta velocidad que afecta periféricamente a los cucharones giratorios. El inyector utiliza una boquilla fija y una lanza ajustable que permite el control del caudal. (Aggidis G. A., 2014), (Aggidis G. A., 2010).

Desde que fue patentada por primera vez en 1889, la turbina Pelton ha sido objeto de muchos proyectos de investigación. Sólo sobre esta base se puede pensar que la física, es decir, los mecanismos de flujo, en la turbina se entiende completamente debido a la era de la tecnología. Sin embargo, la realidad del conocimiento dentro de las turbinas Pelton es que todavía hay áreas dentro de la física que todavía no se entienden completamente. Por lo tanto, estas lagunas en la comprensión del flujo dentro de las turbinas Pelton han sido de gran interés por parte de la comunidad investigadora dentro de múltiples campos.

Esto se debe al aumento de la demanda de energía a nivel mundial, además del creciente enfoque en satisfacer la creciente demanda mediante la utilización de recursos de energía renovable. Un aumento de la eficiencia en el orden del 0,1% conduciría a un gran aumento de la producción de energía. (Statistics Norway, 2011).

A medida que el desarrollo tecnológico de las fuentes de energía limpia se ha convertido en un tema importante en todo el mundo, la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala con menores emisiones de gases de efecto invernadero y mayores sensibilidades energéticas se ha investigado activamente. (Seme S, 2018).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1. Estado del arte:

Durante los últimos años las pruebas experimentales en laboratorios se han desarrollado con mayor frecuencia, con el propósito de contrastar los resultados obtenidos desde los simuladores en software bajo condiciones ideales y comprobar la variación con respecto a las pruebas físicas, que van acompañadas de gran cantidad de condiciones externas que afectan el resultado y ponen en discusión las variables obtenidas.

Dentro de los cuales podemos encontrar las siguientes pruebas experimentales:

(PARKINSON, 2002), desarrolló un método de anemometría láser Doppler (LDA) e investigó los chorros de agua que se descargan en el aire utilizando el método LDA. Usaron dos tipos de tubería conectada a una boquilla. Uno era un tubo recto, mientras que el otro era un tubo con un codo de 90 grados. Midieron la distribución de la velocidad en el chorro con el método LDA y discutieron el efecto de la curvatura en la distribución de la velocidad. Obtuvieron el resultado de que la curva afecta fuertemente el flujo en el chorro. En estos trabajos anteriores se emplearon varios métodos de medición por contacto para obtener características de flujo, como el ancho de dispersión del chorro y la distribución de la velocidad. En la medida de la velocidad con un tubo de Pitot, el tubo penetraba en el chorro de agua. En el método de medición eléctrico, las sondas eléctricas tocaron la superficie del chorro de agua. En el método LDA, una cuña óptica hizo contacto con la superficie del chorro para garantizar que los rayos láser se transmitieran a través de la superficie del chorro.

(Parkinson E, 2002) se realizó una investigación centrada en el análisis numérico y experimental del 3D libre Flujo superficial en una turbina Pelton. En particular, dos condiciones típicas de flujo que ocurren en una turbina Pelton a escala: se realizó una configuración con una entrada recta, así como una configuración con una entrada a 90 grados (codo) aguas arriba de la boquilla. Los resultados numéricos son validados contra investigaciones experimentales realizadas en el laboratorio del Instituto de Mecánica de Fluidos (FLM).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el año 2007, Zhang y Casey utilizaron el método de velocimetría láser Doppler (LDV) para analizar las características del flujo del chorro de la boquilla de la turbina Pelton. Sus resultados de investigación revelaron que la estela generada por la capa límite en la superficie de la aguja de lanza afectó el camino de la distribución de velocidad del chorro y que el flujo secundario generado aguas arriba de la boquilla actuó como la causa de la deformación del flujo del chorro aguas abajo (Zhang Z, 2007).

(Peron M, 2008), analizaron el estado del arte de patrones del chorro, subrayado por dos proyectos de rehabilitación típicos para la mejora de chorro en grandes hidroeléctricas.

(Thomas Staubli, 2009) examinaron los factores que afectan la calidad del chorro: la dispersión del chorro definida por el ensanchamiento del chorro en aumento con la distancia al inyector y por la densidad de la mezcla de agua - aire en la periferia del chorro; desviación, la deformación o excentricidad del chorro; La distribución no homogénea del rango de velocidad; La rotación del chorro en descargas secundarias, el grado de turbulencia, los choques de caídas en la superficie del chorro o burbujas de aire dentro del chorro.

Por otra parte, Staubli comparó los cambios en el rendimiento de la turbina de acuerdo con la difusión del chorro a través de la visualización del flujo y las pruebas de rendimiento, y confirmó que la difusión del chorro es la causa principal de la disminución del rendimiento de la turbina (Staubli T, 2010).

En el año 2015 P. Unterberger realizó un estudio con el objetivo de examinar la influencia de diferentes ángulos de carcasa de la boquilla en combinación con diferentes ángulos de aguja y contornos de aguja para el chorro libre de las boquillas Pelton. Para ello, se desarrolló un método de medición óptica con su correspondiente software de medición.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los resultados obtenidos proporcionan información sobre la ubicación y el tamaño de la contracción máxima del chorro, el ángulo de salida del chorro, el ángulo de divergencia del chorro, las características de la boquilla y eficiencia (P. Unterberger, 2015).

Muchos investigadores se han ocupado de medir este ancho, y en muchos casos se emplearon métodos de medición por contacto en la superficie del chorro de agua. Para evitar efectos no deseados causados por el contacto en la superficie del chorro, (Yuki Funami, 2016), introdujo métodos de medición sin contacto con un instrumento láser para medir el ancho de dispersión del chorro. En las mediciones, un transmisor emite un rayo láser en forma de hoja a un receptor. El chorro de agua entre el transmisor y el receptor interrumpe el rayo láser y crea una sombra. Se miden los valores mínimo y máximo del ancho de la sombra. Además, las imágenes del chorro de agua se toman con una escala y el ancho de la sombra se mide a partir de las imágenes. Se realizaron los experimentos sobre varios golpes de aguja. Se obtuvieron tres tipos de ancho consistentes con la estructura del chorro. En los resultados, se puede concluir que nuestros métodos de medición sin contacto son factibles. Los datos de los anchos de dispersión del chorro y la conicidad del chorro se obtuvieron y son útiles para futuras aplicaciones.

En el año 2019 se realizaron experimentos y simulaciones numéricas para investigar el efecto de la excentricidad de la aguja de lanza en el flujo del chorro en microturbinas Pelton. Los resultados muestran que la excentricidad de la aguja de la lanza provoca la difusión del chorro en condiciones de bajo flujo y aumenta significativamente la pérdida de la boquilla de la lanza (inyector). (Hyuk Jung, 2019).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo general, inicialmente se planteó el diseño a nivel de detalle de un dispositivo que permitiera la medición experimental de la distorsión del chorro a lo largo de su eje de salida. Una vez concebido este dispositivo, y partiendo de los resultados obtenidos en un proyecto anterior, se procedió a la fabricación del dispositivo para la medición de la distorsión del chorro y de un inyector Pelton con dos (2) agujas de ángulos 60° y 75° . Finalmente se realizaron las pruebas experimentales en las cuales se determinaron los efectos de la geometría de la aguja (longitud y ángulo del cono) en la distorsión del chorro. A continuación, se realiza la ampliación de cada una de las tres etapas anteriormente mencionadas (Diseño, fabricación y experimentación).

3.1. Diseño del dispositivo de medición de la distorsión del chorro.

Para la elaboración del dispositivo de medición con el cual se obtuvo la distorsión del chorro al salir del inyector, se tomaron como guía algunos dispositivos utilizados en mediciones de estudios anteriores, los cuales se presentan a continuación.

Este dispositivo consta de un aro de medición instalado sobre 2 ejes horizontales, en el cual se desplaza un anillo que contiene un micrómetro para tomar la circunferencia del chorro, la desventaja de este equipo es su orientación y el desajuste de sus piezas móviles durante la toma de datos. (Ver Figura 1).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

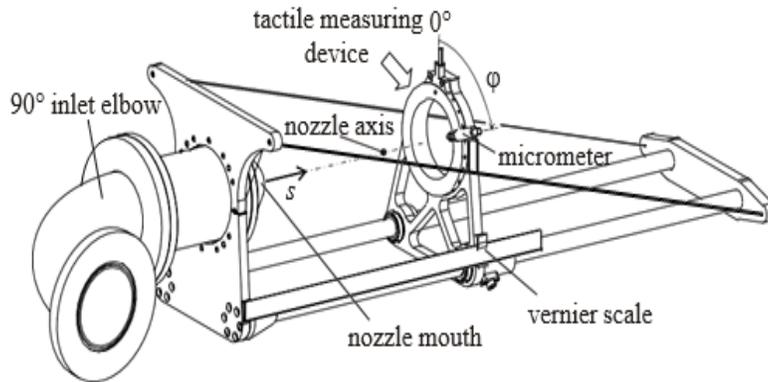


Figura 1. Dispositivo de medición por contacto. Imagen tomada de (R Fiederer, 2010)

Este dispositivo de medición permite por medio de un haz de luz detectar la distorsión del chorro al atravesarlo, este equipo es de alto costo debido a la alta tecnología utilizados. (Ver Figura 2).



Figura 2. Dispositivo de medición laser. Imagen tomada de (Thomas Staubli, 2009)

Una vez realizado el análisis de los dispositivos más representativos para la medición de la distorsión del chorro de una turbina Pelton, se procedió con el diseño del dispositivo a fabricar como objetivo de este estudio.

La estructura del dispositivo que mide la distorsión del chorro del inyector a diferentes longitudes de la boquilla del inyector es fabricada en impresora 3D, utilizando material PLA como se muestra en la Figura 3. Diseño 3D de las piezas del dispositivo de medición. A) Anillo guía, B) Anillo base, C) barra guía desplazamiento, D) Anillo medidor de ángulos.

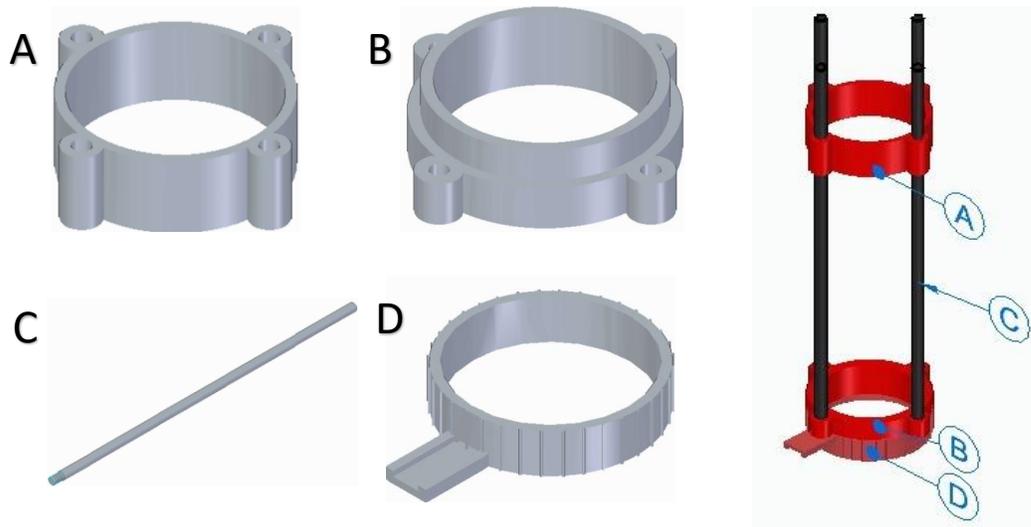


Figura 3. Diseño 3D de las piezas del dispositivo de medición. A) Anillo guía, B) Anillo base, C) barra guía desplazamiento, D) Anillo medidor de ángulos.

Tomando como guía los dispositivos utilizados en pruebas anteriores, se decide implementar el mismo tipo de estructura circular, de manera que permita el paso de chorro del inyector por el interior de este y a su vez obtener la distorsión de la circunferencia del chorro por medio de un elemento de medición (calibrador) el cual entra en contacto con la capa superficial externa del chorro, obteniendo un distanciamiento con respecto a la posición inicial de la herramienta de medición, esta medida será tomada cada 30° hasta completar la circunferencia completa como se muestra en la *Figura 4*. Dispositivo de medición de distorsión del chorro fabricado. A) Vista inferior, B) Vista frontal, C) Vista superior.

Figura 4. Dispositivo de medición de distorsión del chorro fabricado. A) Vista inferior, B) Vista frontal, C) Vista superior.

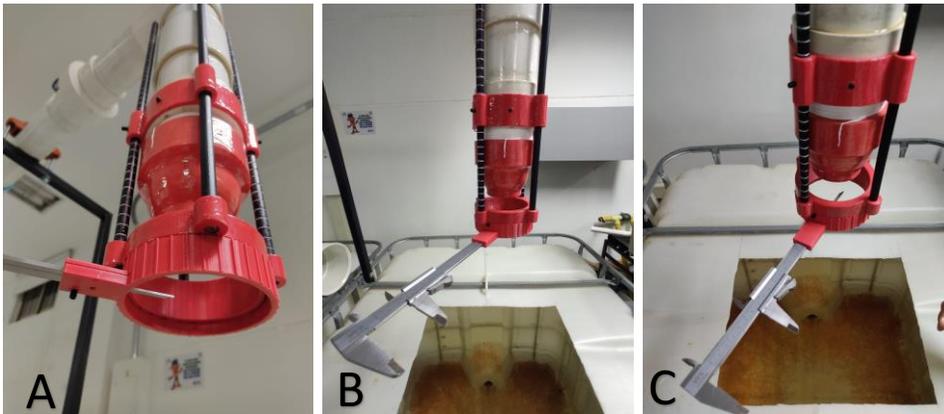


Figura 4. Dispositivo de medición de distorsión del chorro fabricado. A) Vista inferior, B) Vista frontal, C) Vista superior.

3.2. Fabricación del conjunto inyector – dispositivo de medición.

Para la fabricación del prototipo del inyector utilizado en el presente estudio experimental, se toma como base la geometría en codo a 90 grados, debido a las limitantes de espacio del laboratorio de pruebas y al montaje inicial de la tubería existente, para esto se hace uso de los siguientes elementos: Ver *Tabla 1*.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Tabla 1 se muestran los componentes que integran el inyector, con las diferentes etapas de prototipado y variaciones de las agujas como parámetro de estudio.

Tabla 1. Prototipado de inyector de turbina Pelton.

Elemento	Item	Plano de fabricacion	Imagen	Descripción
Manometro	1	Comercial		Manometro seco con conexión vertical de 1/4", y rango de 100 PSI (7 BAR)
Acople Universal	2	Comercial		Acople universal de 3" en PVC. (200 PSI de presión)

Elemento	Item	Plano de fabricacion	Imagen	Descripción
Codo 90°	3	Comercial		Codo a 90° de 3" en PVC. (200 PSI)
Unión lisa	4	Comercial		Union lisa de 3" en PVC. (200 PSI)
Soporte circular interior	5	Apendice D		Soporte circular interior en acero inoxidable de 5mm de espesor.

Elemento	Item	Plano de fabricacion	Imagen		Descripción
Aguja a 75°	6	Apéndice B			Aguja a 75° fabricada en PLA y aluminio mecanizada en CNC.
Aguja a 60°	7	Apéndice A			Aguja a 60° fabricada en PLA y aluminio mecanizada en CNC.

Elemento	Item	Plano de fabricacion	Imagen		Descripción
Boquilla	8	Apéndice C			Boquilla fabricada en aluminio, mecanizada en CNC.

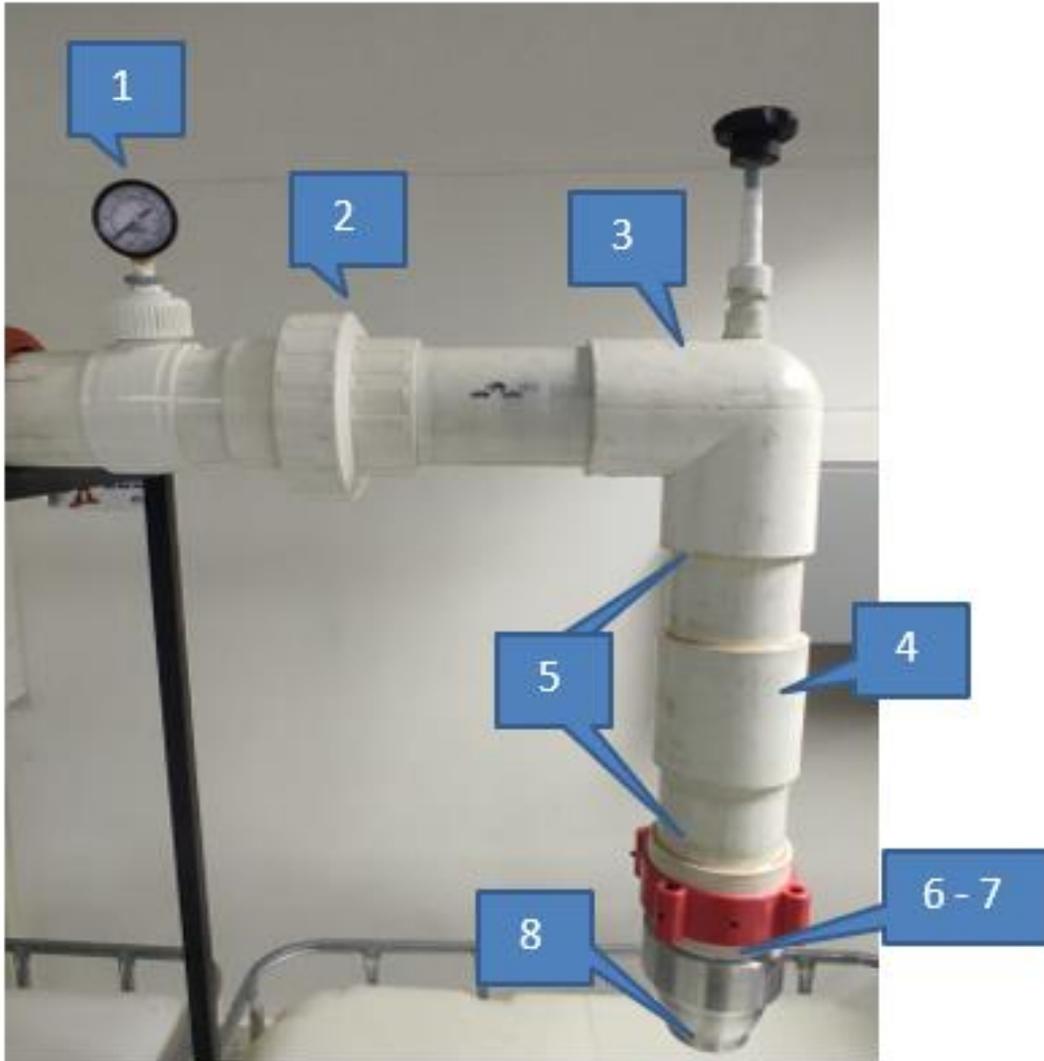


Figura 5. Ensamble del inyector

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El conjunto de estos elementos fabricados da como resultado un prototipo de inyector de turbina Pelton con su respectivo dispositivo de medición para detectar la distorsión del chorro a diferentes longitudes y ángulos en posición vertical, representados en la Figura 6.

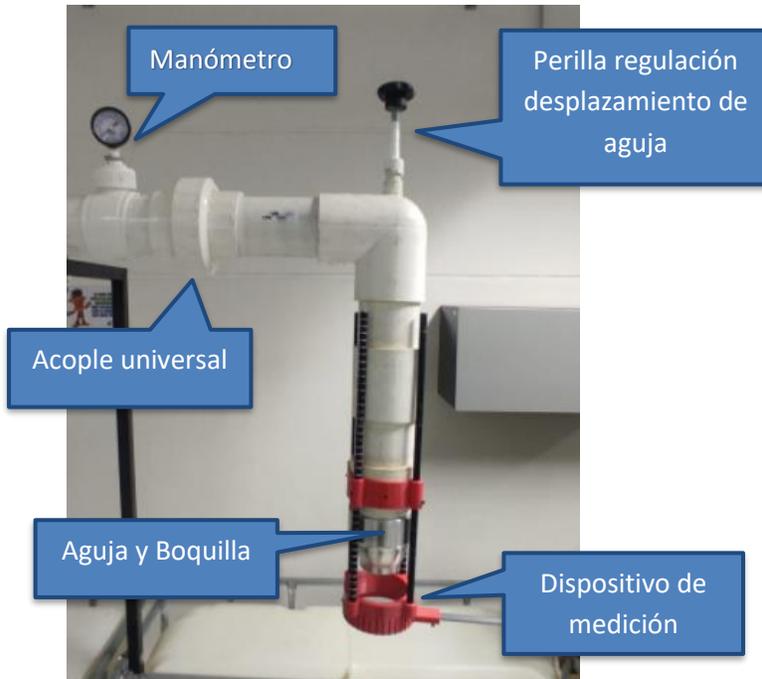


Figura 6. Conjunto inyector – elemento de medición del banco de pruebas.

1.3. Desarrollo de las pruebas experimentales:

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se utilizó el banco hidráulico existente en el laboratorio de Modelado, prototipos y simulación del Instituto Tecnológico Metropolitano (Parque i) el cual se muestra en la (Figura 7) Y (Figura 8) el cual se encuentra conformado principalmente por:

A). Inyector: Dispositivo en el cual se le realizan las mediciones del chorro para determinar su distorsión.

B). Bomba de inyección: Equipo utilizado para impulsar el fluido hacia el inyector del banco de pruebas.

C). Bomba de recirculación: Equipo utilizado para reabastecer el tanque alimentador donde se almacena el fluido.

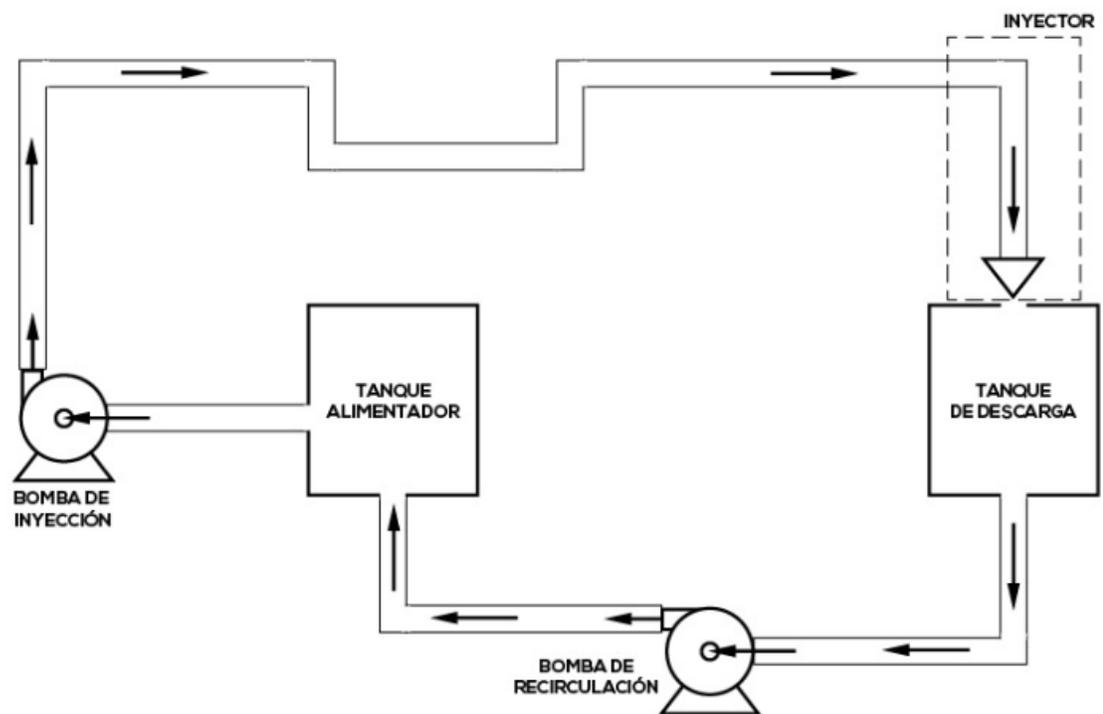


Figura 7. Esquema simbólico del banco de pruebas ITM parque i.

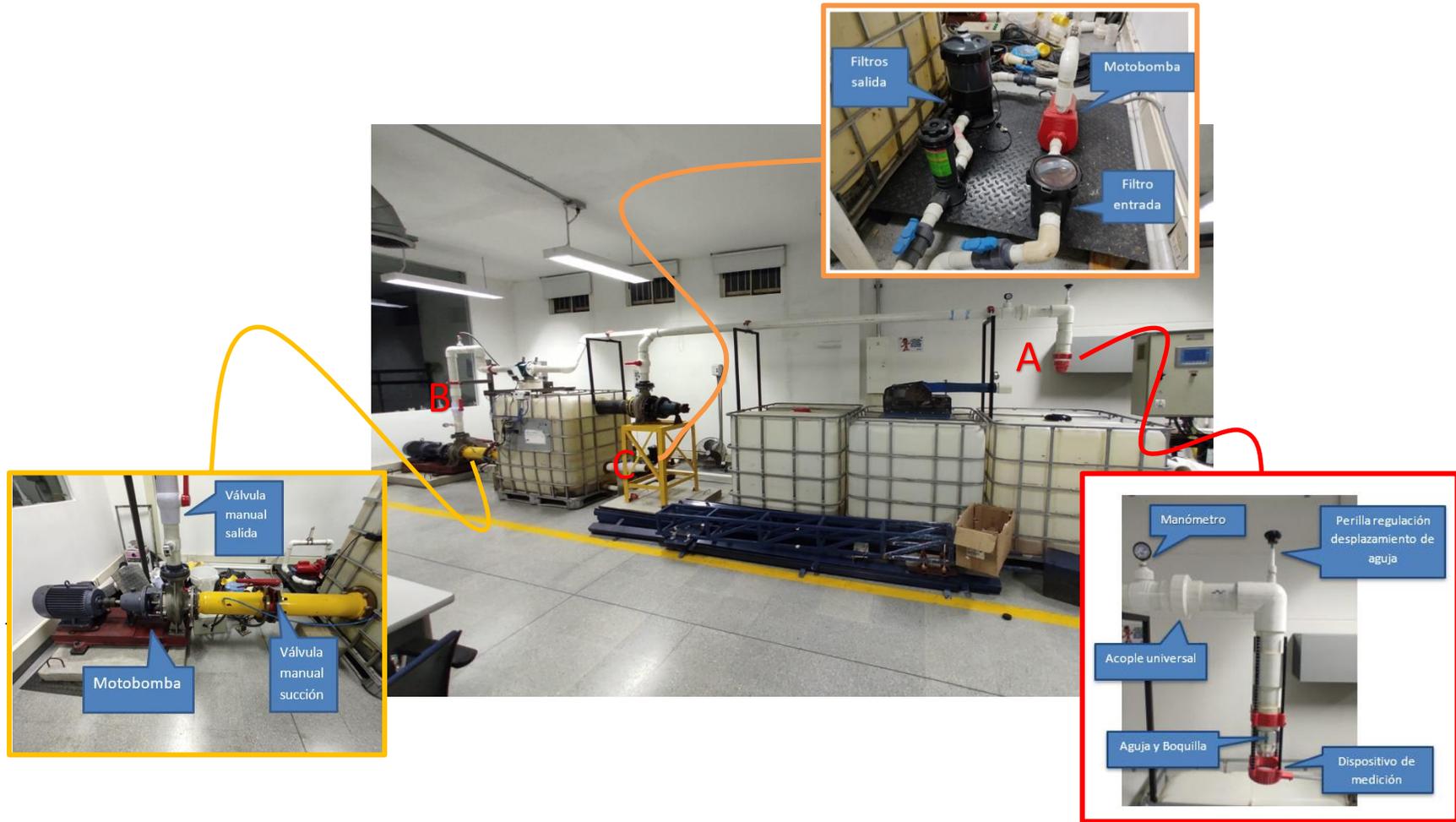


Figura 8. Esquema del montaje (A) inyector, (B) bomba de inyección, (C) bomba de recirculación, implementado en el banco hidráulico de pruebas ITM parque i.

En la Tabla 2, se presentan los diferentes escenarios a realizar con el fin de determinar el efecto del ángulo y longitud de la aguja en la calidad del chorro.

Tabla 2. Parámetros de configuración de los experimentos realizados.

Angulo de la aguja (grados)	Caudal (m ³ /s)	Apertura del inyector (%)
60; 75	0.0024; 0.0073; 0.0095	100

En la Figura 9 se muestran las zonas de medición de la distorsión del chorro, en las cuales se plantearon 5 planos de referencia ubicados a unas distancias normalizadas por el diámetro de la boquilla (s/d_1), donde s y d_1 corresponden a la distancia en mm con respecto a la salida del inyector y diámetro de salida del inyector, respectivamente.

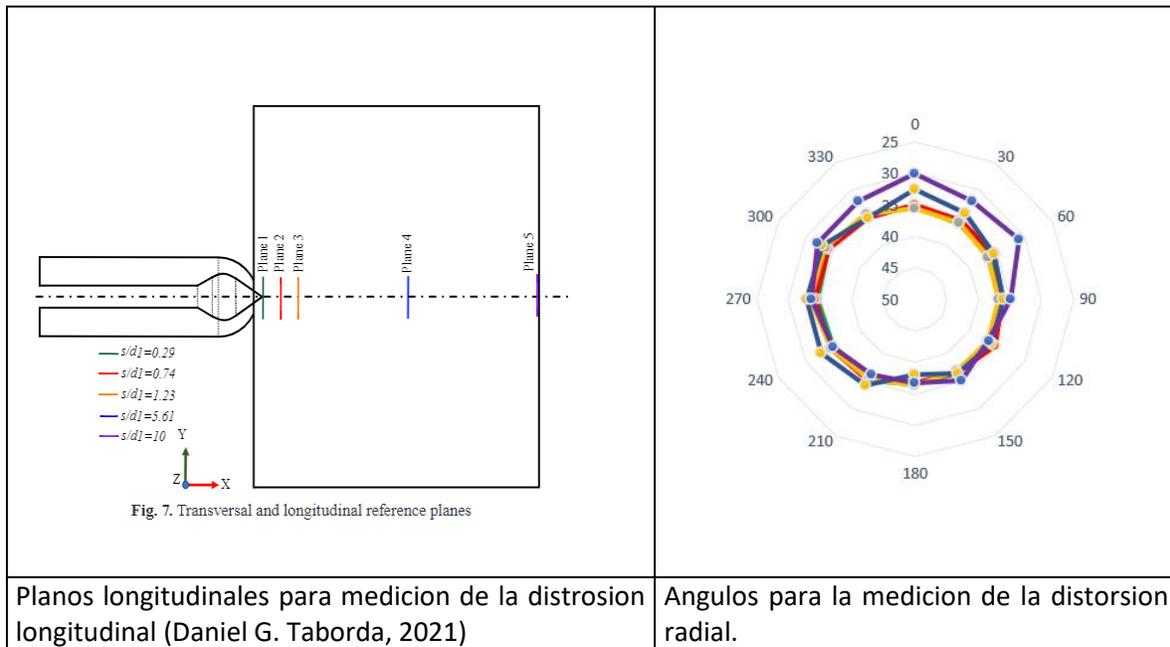


Figura 9. Puntos de referencia de los datos obtenidos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la configuración de los diferentes escenarios, inicialmente se realizó una prueba de hermeticidad del inyector, la cual consistió en cerrar totalmente el inyector y accionar la bomba para evidenciar que no se presentaba salida de fluido alguno en el montaje realizado. Luego se procedió a realizar la prueba de concentricidad de la aguja, esto para evitar efectos distorsivos asociados a la excentricidad de la aguja respecto a la boquilla. En la Figura 10 se muestran imágenes que evidencian la forma en que se realizaron ambas pruebas iniciales.

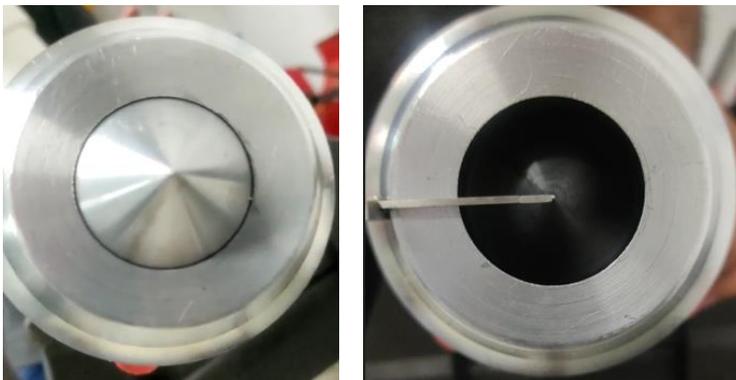


Figura 10. Porcentajes de apertura de la aguja A) Mínimo (0%), B) Máximo (100%).

Una vez validada las posiciones de referencia del inyector (apertura al 0% y 100%), se procedió a realizar la caracterización de la bomba, específicamente toma de presión y caudal conforme la frecuencia del variador de velocidad asociado al motor de la bomba centrífuga utilizada como elemento de aporte de energía al fluido del circuito. En la Tabla 3 se muestran los valores de presión obtenidos a la entrada del inyector conforme la variación de la frecuencia del variador y del porcentaje de apertura del inyector.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 3. Presión obtenida según % apertura del inyector y la frecuencia de operación de la bomba.

Frecuencia variador (Hz)	Apertura del inyector				
	10%	30%	60%	100%	
20	0,0073	0,0065	0,0052	0,0043	MPa
40	0,0551	0,0551	0,0413	0,0413	MPa
60	0,1447	0,1447	0,1241	0,1241	MPa

Concerniente al caudal, se realizaron pruebas de aforo de tanque, de la cual se derivan los resultados presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Caudal medido en el banco de pruebas a diferente frecuencia en la bomba instalada.

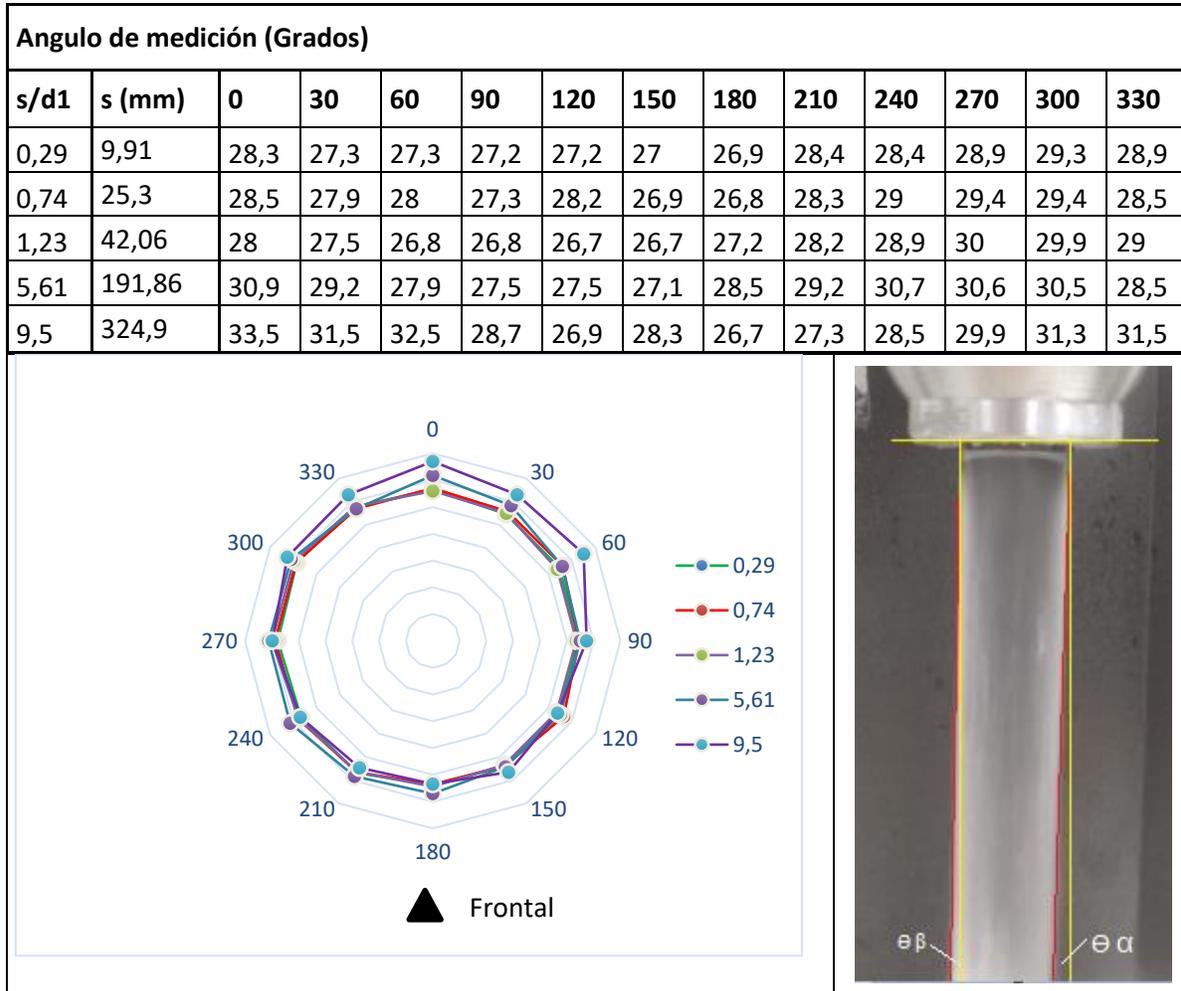
Frecuencia variador (Hz)	Volumen depositado (m ³)	Tiempo de medición (s)	Caudal (m ³ /s)
20	0,09464	39	0,002425
40	0.0946353	13	0,007276
60	0.0946353	10	0,009463

Los resultados experimentales de la distorsión del chorro para los escenarios previamente planteados se presentan a continuación. Inicialmente se muestran resultados cuantitativos obtenidos por medio del dispositivo diseñado en este trabajo, discriminando la distorsión radial y longitudinal. Posteriormente se muestran análisis cualitativos de la calidad del chorro, tales como desviación respecto al eje central de la aguja, formación de gotas, difusión con el aire ante la pérdida de la capa límite del fluido.

Resultados de distorsión del chorro: radial y longitudinal:

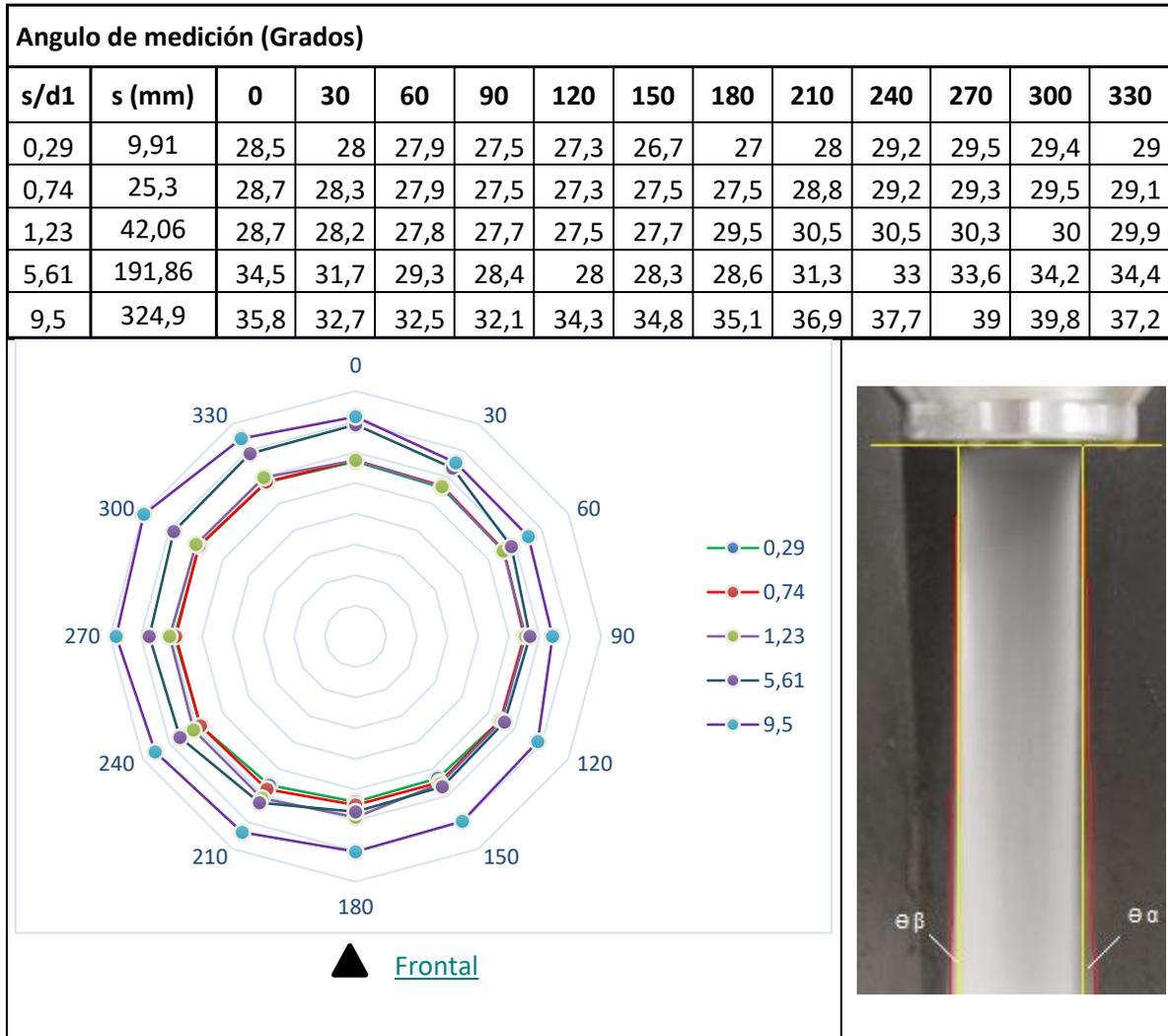
Resultado de prueba experimental con aguja de 60°, 100% de apertura y caudal de 0,002425 m³/s.

Tabla 5. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 60°, 100% de apertura y 0,002425 m³/s.



Resultado de prueba experimental con aguja de 60°, 100% de apertura y caudal de 0,007276 m³/s.

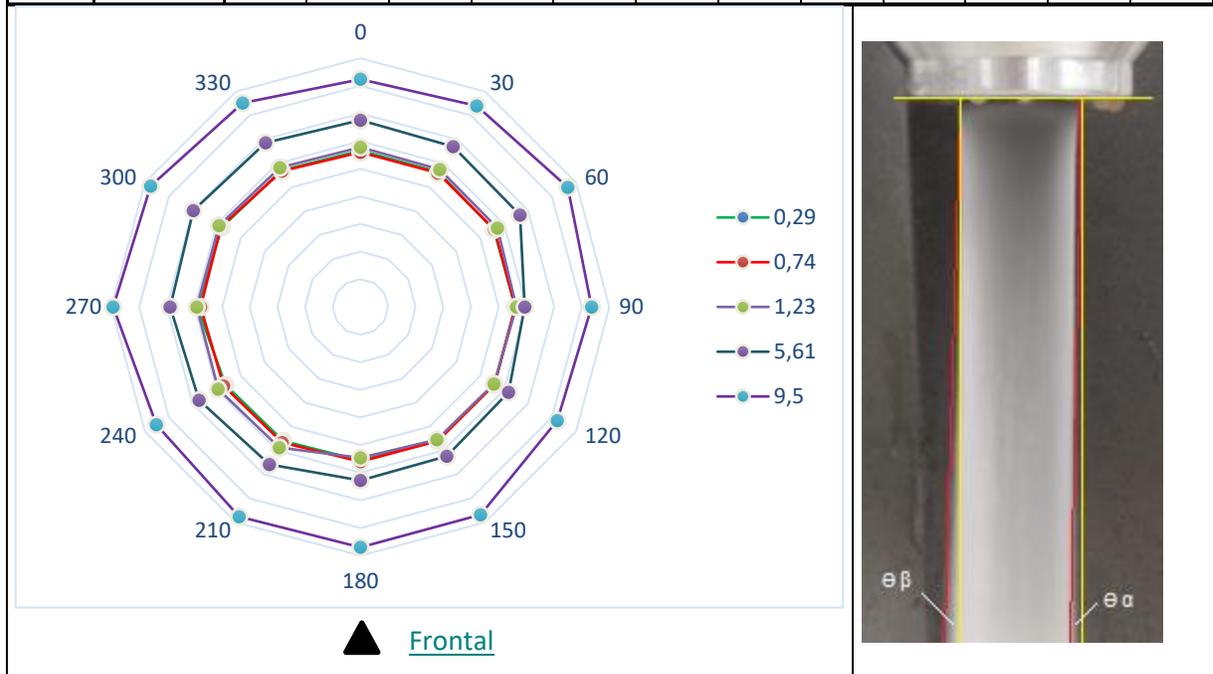
Tabla 6. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 60°, Apertura 100% y 0,007276 m³/s.



Resultado de prueba experimental con aguja de 60°, 100% de apertura y caudal de 0,009463 m³/s.

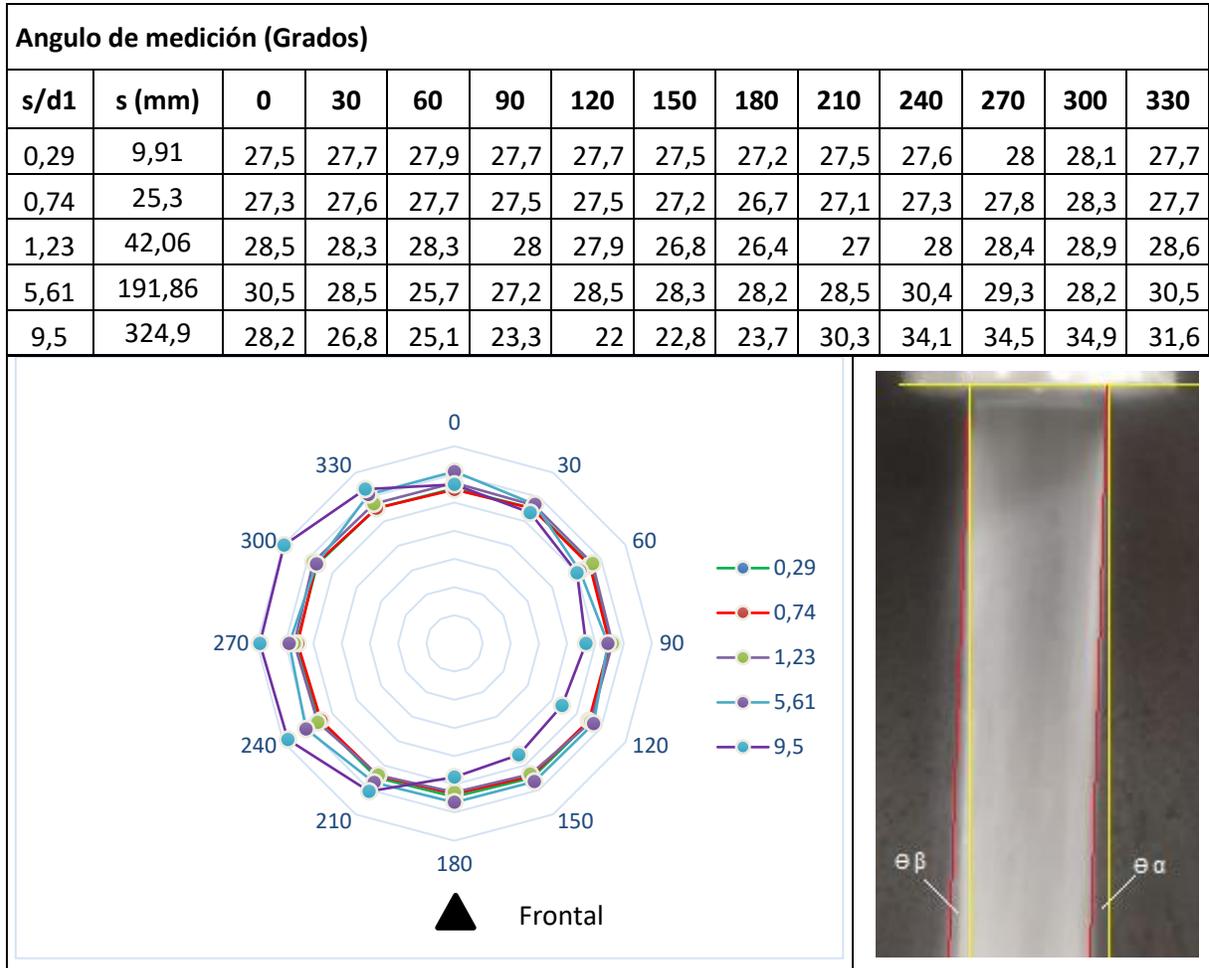
Tabla 7. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 60°, Apertura 100% y 0,009463 m³/s.

Angulo de medición (Grados)													
s/d1	s (mm)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
0,29	9,91	28,3	28,2	27,9	28	28	27,9	27,8	28	28,2	29,5	28,9	28,5
0,74	25,3	28	28	28	28	28	28	28	28,3	28,6	28,9	29,1	28,4
1,23	42,06	28,9	28,7	28,6	28,2	27,9	27,7	27,3	29,4	29,7	29,6	29,5	29,1
5,61	191,86	33,8	33,5	33,3	29,7	30,9	31,2	31,4	32,9	33,7	34,4	34,9	34,3
9,5	324,9	41,2	42	43,3	41,8	41,1	43,4	43,5	43,8	42,6	44,7	43,8	42,6



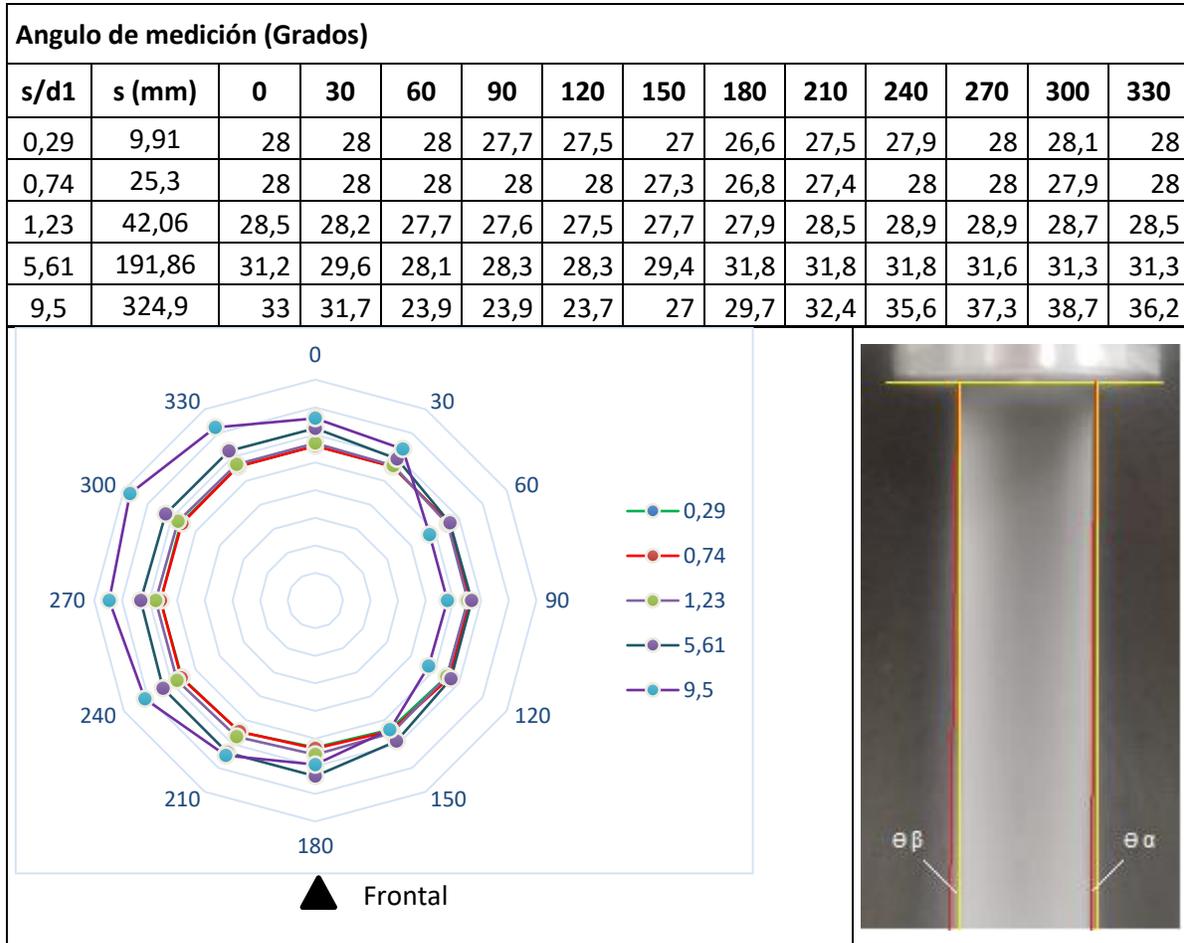
Resultado de prueba experimental con aguja de 75°, 100% de apertura y caudal de 0,002425 m³/s.

Tabla 8. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 75°, Apertura 100% y 0,002425 m³/s.



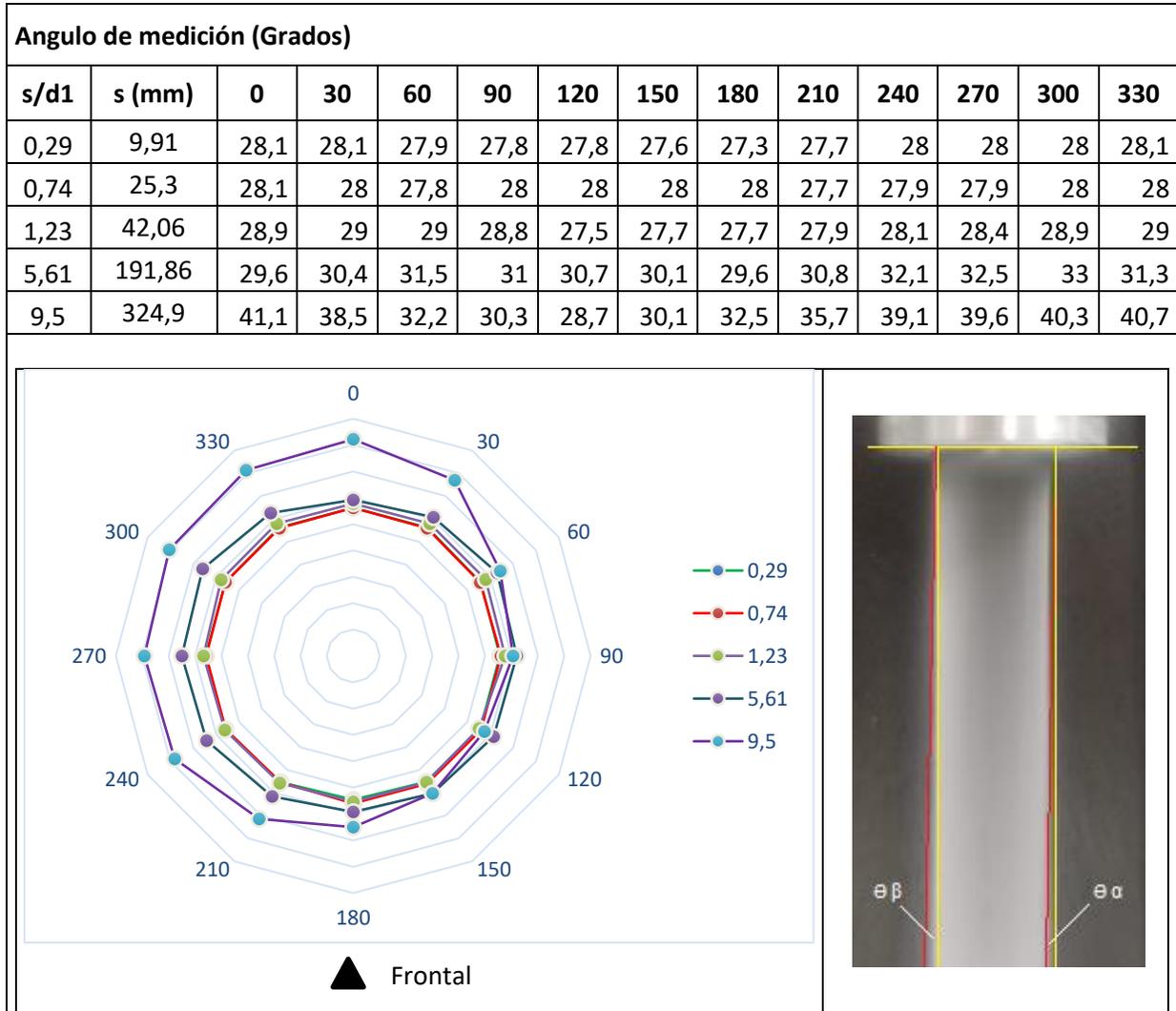
Resultado de prueba experimental con aguja de 75°, 100% de apertura y caudal de 0,007276 m³/s.

Tabla 9. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 75°, Apertura 100% y 0,007276 m³/s.



Resultado de prueba experimental con aguja de 75°, 100% de apertura y caudal de 0,009463 m³/s.

Tabla 10. Resultados de medición a diferentes planos de referencia conforme a la **Figura 9**, aguja de 75°, Apertura 100% y 0,009463 m³/s.



Según los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a las agujas de 60° y 75° se puede observar que la distorsión radial es estable y geoméricamente uniforme en las primeras 3 distancias de medición (s/d_1 : 0.29, 0.74 y 1.23), por el contrario, al aumentar dicha distancia en la medición del chorro del inyector este comienza a generar una distorsión del chorro

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

que afecta drásticamente la geometría de este tal como se observa en los planos s/d_1 : 5.61 y 9.5; lo cual es consistente con los resultados experimentales encontrados por en la literatura de referencia (Thomas Staubli, 2009).

La Tabla 11 presenta los resultados comparativos de la distorsión radial del chorro comparados contra los diámetros d_1 (Diámetro de boquilla) y d_0 (diámetro del chorro). De la tabla se encuentra que a medida que se incrementa el ángulo de la aguja (de 60° 75°) y se aumenta el caudal volumétrico de agua (de 0.002425 a 0.009463 m³/s) se presenta un incremento en la distorsión máximo del chorro del 13% y -13 %, medidos con respecto a los diámetros d_1 (Diámetro de boquilla) y d_0 (diámetro del chorro), respectivamente. Lo cual puede ser verificado me

Tabla 11: Comparacion de resultados de la distorsion radial del chorro.

Resumen distorsión Radial			
Ángulo aguja [°]	Caudal [m ³ /s]	Distorsión max. / d1	Distorsión max/ d ₀
60	0,002425	14%	18%
	0,007276	16%	40%
	0,009463	31%	57%
75	0,002425	22%	22%
	0,007276	36%	36%
	0,009463	44%	44%

La mayor distorsión radial del chorro se presenta en la última distancia de medición ($s/d_1=9.5$) donde se observa que la circunferencia de este sobresale de las mediciones anteriores teniendo su distorsión máxima entre los 180° y los 330° en la mayoría de los casos. (R Fiereder, 2010).

Por otra parte, de la Tabla 5 a la Tabla 10 el cono formado por el chorro del inyector sufre una distorsión longitudinal representado en los ángulos ($\Theta \alpha$ y $\Theta \beta$), los cuales permiten visualizar una inclinación al costado del $\Theta \beta$; como lo muestran las imágenes tomadas durante la ejecución de las pruebas, de las cuales se puede afirmar que a mayor distancia de la salida de la boquilla, mayor será la distorsión longitudinal, esta situación puede generar perdidas al no impactar correctamente sobre los cangilones de la turbina Pelton, lo que se traduce en pérdida de eficiencia y energía. (Takashi Kumashiro, 2019)

Estos dos tipos de distorsiones obtenidos a partir de los resultados puede estar asociado a diferentes factores como: la excentricidad de la aguja con respecto a la boquilla, perdidas

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en la boquilla y en el tipo de material utilizado para la fabricación de la aguja. (Hyuk Jung, 2019)

Además de las características propias del inyector (diseño, fabricación e instalación), se debe tener presente que existen turbulencias internas del agua que viene por la tubería, los soportes del banco de pruebas y los materiales utilizados para realizar dichas pruebas. (Takashi Kumashiro, 2019)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se presenta el diseño, fabricación y e implementación de un dispositivo de medición de la distorsión del chorro de un inyector de turbina Pelton. Adicionalmente se presenta la fabricación del inyector y un conjunto de agujas en las cuales se varían tanto la longitud como el ángulo del cono. Con este trabajo se aporta al estudio de mejora de los inyectores de turbinas Pelton con el objetivo de incrementar su eficiencia.

Del análisis de los resultados se puede establecer que a variaciones en el ángulo de la aguja de 75° a 60° para un caudal de 0.0094 m³/s se logra reducir en un 13% la distorsión radial máxima del chorro.

Realizando un análisis cualitativo de las imágenes que capturan la geometría del chorro se puede concluir que, tanto el incremento en el ángulo del cono de la aguja como el caudal volumétrico incrementan la distorsión tanto longitudinal (excentricidad y desviación entre la línea de eje del inyector y el chorro) como radial (aumento del diámetro del chorro).

Mediante las pruebas se logró demostrar que el prototipo efectivamente permite realizar las mediciones requeridas con precisión adecuada.

Al momento de contrastar los resultados experimentales con respecto a los resultados numéricos arrojados en un estudio previo sobre la distorsión que se presenta en el chorro del inyector realizado por estudios anteriores en la institución, se observó que los parámetros indicados en el estudio teórico previo no son comparables con los obtenidos en el estudio real, debido a que los caudales propuestos en el anterior estudio superan las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

capacidades de la bomba del prototipo, además se presentaban vibraciones y condiciones inseguras que ponían en riesgo la integridad de las personas y de los equipos presentes en el laboratorio de pruebas del parque i.

Como recomendación para llevar a cabo este tipo de estudios experimentales se recomienda hacer uso de herramientas de medición de alta precisión, también es importante evaluar el diseño estructural de un inyector diferente al inyector a 90 grados para evitar posibles turbulencias internas en el fluido.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Aggidis, G. A. (2010). The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. *Renewable Energy*, 35, 2632-2638.
- Aggidis, G. A. (2014). Hydro turbine prototype testing and generation of performance curves: Fully automated approach. *Renewable Energy* 71, 433-441.
- Daniel G. Taborda, J. S.-A.-V. (2021). CFD ANALYSIS OF THE NEEDLE TIP ANGLE IN PELTON INJECTOR ON JET QUALITY FOR THE POWER GENERATION. *EUREKA: Physics and Engineering*, 45-59.
- Hyuk Jung, Y. S. (2019). Influence of spear needle eccentricity on jet quality in micro Pelton turbine for power generation. *Energy*, 58-65.
- P. Unterberger, C. B. (2015). STUDIES ON THE FREE JET OF PELTON NOZZLES. *Conference: Reliable hydropower for a safe and sustainable power production*, 1-12.
- Parkinson E, G. H. (2002). Experimental and numerical investigation of the free jet flow in a model nozzle of a Pelton turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-8.
- PARKINSON, Z. Z. (2002). LDA Application and the Dual-Measurement-Method in Experimental Investigations of the Free Surface Jet at a Model Nozzle of a Pelton turbine. *11th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*. lisbon, portugal.
- Peron M, P. E. (2008). Importance of jet quality on Pelton efficiency and cavitation. *International conference on hydraulic efficiency measurements.*, 3-6.
- R Fiederer, S. R. (2010). Numerical and experimental investigation of the 3D free surface flow in a model Pelton turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Seme S, S. K. (2018). Optimal price of electricity of solar power plants and small hydro power plants e technical and economical part of investments. *Energy*, 87-95.
- Statistics Norway*. (2011). Obtenido de Energy consumption per household 2009 - Major increase in the use of heat pumps: http://www.ssb.no/english/subjects/01/03/10/husenergi_en/
- Staubli T, W. P. (2010). Efficiency increase by jet quality improvement and reduction of splashing water in the casing of Pelton turbines. *16th international seminar on hydropower plants*.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Taborda, D. G. (2019). *Influencia de la geometría de la aguja de un inyector de turbina Pelton en la potencia generada*. Medellín: Trabajo de grado.

Takashi Kumashiro, S. A. (2019). Numerical investigation of the jet velocity profile and its influence on the Pelton turbine performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 240*,.

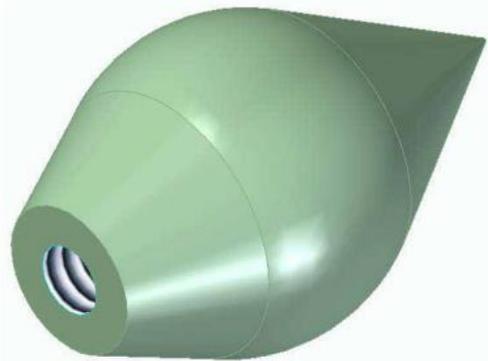
Thomas Staubli, A. A. (2009). The impact of beam quality on the efficiency of Pelton turbines. *Wasser Energie Luft*, 181-194.

Yuki Funami, R. H. (2016). Non Contact Measurements of Water Jet Spreading Width with a Laser Instrument. *Thermal Science Vol.25*, 349-354.

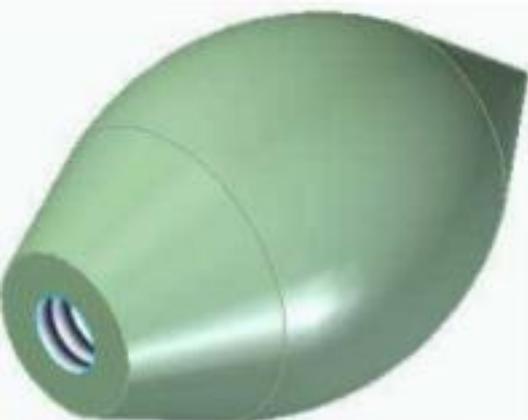
Zhang Z, C. M. (2007). Experimental studies of the jet of a Pelton turbine. *Power Energy*, 81-92.

APÉNDICE

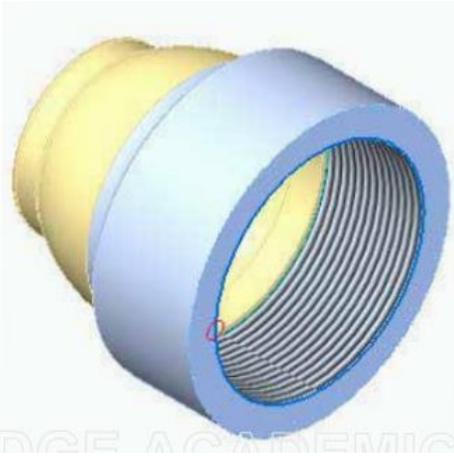
Apéndice A: Aguja 60°

	 Aguja 60°.pdf
---	--

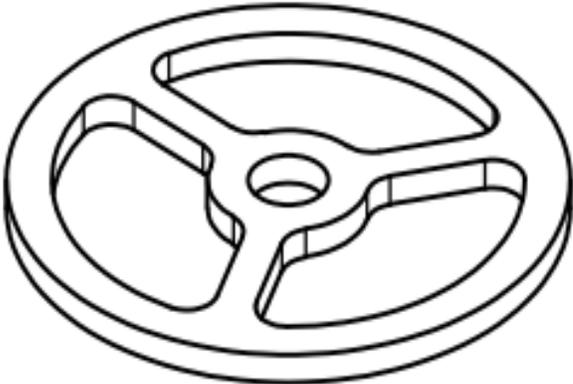
Apéndice B: Aguja 75°

	 Aguja 75°.pdf
---	--

Apéndice C: Boquerel

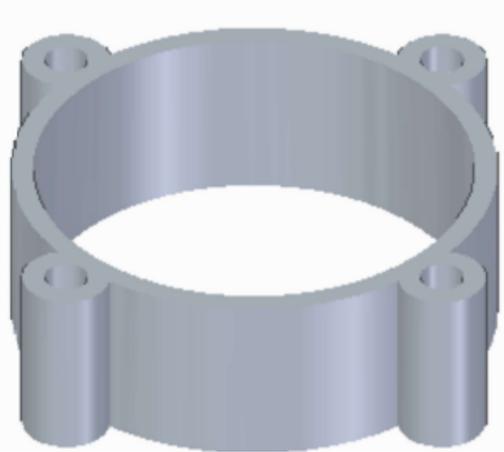
	 Boquilla.pdf
---	---

Apéndice D: Soporte circular interior

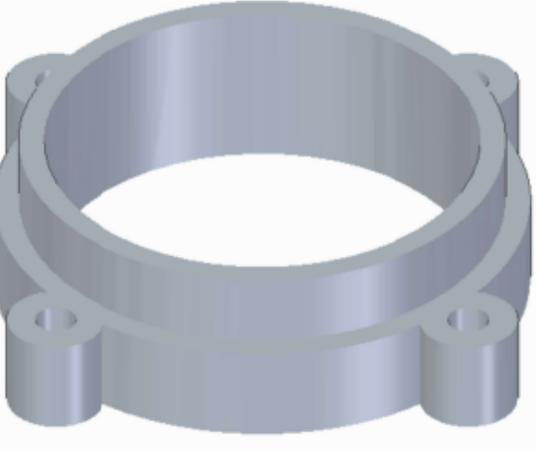
	 SOPORTE CIRCULAR INTERIOR
---	---

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice E: Anillo guía

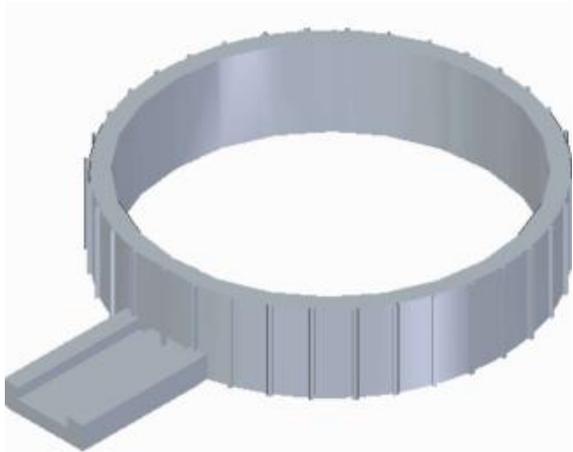
	 ANILLO GUIA..pdf
---	---

Apéndice F: Anillo base

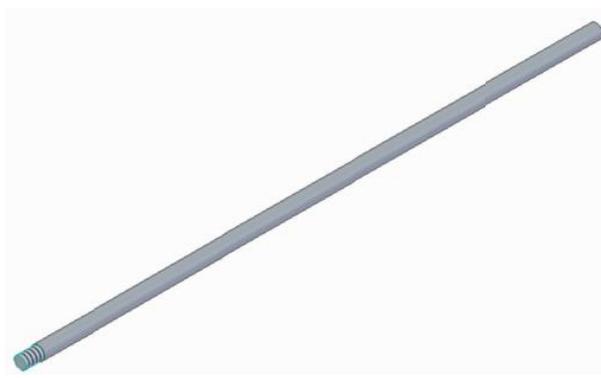
	 ANILLO BASE..pdf
---	---

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Apéndice G: Anillo medidor de ángulos

	 ANILLO MEDIDOR DE ANGULOS..pdf
---	---

Apéndice H: Barra guía desplazamiento

	 BARRA GUIA DESPLAZAMIENTO..f
---	---

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES *ElkinHA* *Yan Karlo Quintero C.*

FIRMA ASESOR *Jorge Sibers*

FECHA ENTREGA: 30-08-2022

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO X ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____