

Incidencia de la Razón de Aspecto en la Intensidad de un Vórtice en un Generador con Flujo Incidente Tangencial



Héctor Daniel López Rivera



INCIDENCIA DE LA RAZÓN DE ASPECTO EN LA INTENSIDAD DE UN
VÓRTICE EN UN GENERADOR CON FLUJO INCIDENTE TANGENCIAL

HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

INCIDENCIA DE LA RAZÓN DE ASPECTO EN LA INTENSIDAD DE UN
VÓRTICE EN UN GENERADOR CON FLUJO INCIDENTE TANGENCIAL.

Héctor Daniel López Rivera

Trabajo de Grado presentado
como requisito para optar
el título de Ingeniero
Mecánico

DIRECTOR

Ingeniero Efraín del Risco Moreno PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

Nota de Aceptación:

Ing. José Isidro García Melo
Ph.D. Ingeniería Mecánica

Ing. Jairo Antonio Valdez Ortiz
Ph.D. Ingeniería Mecánica

RESUMEN

Este trabajo presenta los experimentos orientados al estudio del comportamiento de un vórtice producido en un dispositivo hidrogenerador de vórtice vertical.

Se construyeron seis configuraciones de hidrogeneradores de vórtice. Cada configuración correspondió a una variación geométrica diferente que se caracterizó por una razón de aspecto, definida como el cociente entre el ancho de la apertura de alimentación a la cámara de vórtice y el diámetro del orificio de descarga.

Se realizaron pruebas de velocidad angular en el vórtice y de velocidad en la entrada a la cámara cilíndrica bajo cada relación de aspecto, variando las condiciones hidrodinámicas. Las mediciones de velocidad angular se realizaron por medio de un correntómetro para vórtice. La toma de las velocidades a la entrada de la cámara se estimó con el tubo de Pitot.

El comportamiento del correntómetro como herramienta de medición se verificó por medio de un agitador electromagnético.

Se desarrolló un análisis dimensional para lograr la interpretación de los vórtices generados bajo cada relación de aspecto.

El vórtice tiene su máxima velocidad angular en la zona más cercana al núcleo de descarga y la máxima velocidad de entrada a la cámara se presenta a la mayor profundidad del canal.

PALABRAS CLAVE: Hidrogenerador, Vortice, Eje Vertical, Correntometro.

AGRADECIMIENTOS:

Expreso mis agradecimientos a todas las personas que hicieron parte de este trabajo de grado, no hago mención de sus nombres por temor a olvidar alguno.

Doy por sentado que su apoyo fue vital en la consecución de los objetivos propuestos.

Contenido

Nomenclatura	8
Lista de figuras	9
Lista de tablas	12
Capítulo 1	13
1.1 INTRODUCCIÓN	13
1.2 ANTECEDENTES	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	23
1.4 OBJETIVOS	24
Capítulo 2	25
2.1 REVISION DE LITERATURA	25
Capítulo 3	32
3.1 METODOLOGIA	32
Capítulo 4	51
4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS GENERADORES DE VÓRTICE	51
4.3 CURVA DE VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE CORRENTOMETRO PARA VÓRTICE	55
4.4 ANÁLISIS DIMENSIONAL	58
4.6 EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL USANDO LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL	63
4.5 SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS QUE GOBIERNAN EL COMPORTAMIENTO DEL VÓRTICE	68
Capítulo 5	102
5.1 CONCLUSIONES	102
Capítulo 6	104
6.1 RECOMENDACIONES	104
6.2 REFERENCIAS	106
6.3 ANEXOS	110

Velocidad angular en dispositivos de fondo plano.	110
Velocidad angular dispositivos de fondo cónico.	114
Planos de los dispositivos hidrogeneradores de vórtice de fondo plano y cónico.	118

Nomenclatura

e : Ancho de la apertura de la entrada tangencial, $[mm]$

D : Diámetro del cilindro, $[mm]$

d : Diámetro del orificio de salida, $[mm]$

H : Altura de la cámara de vórtice, $[mm]$

ρ : Densidad del agua, $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

μ : Viscosidad dinámica, $\left[\frac{N}{m^2s^2}\right]$

R' : Deflexión manométrica, $[mm]$

Vo : Velocidad de entrada a la cámara de vórtice, $\left[\frac{m}{s}\right]$

ω : Velocidad angular, $[rpm]$

Γ : Circulación, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

g : Gravedad, $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h : Altura del vórtice o tirante, $[mm]$

Δh : Diferencia de la altura de la superficie libre en el canal y del vórtice en el cilindro, $[mm]$

r : Radio de medición de la velocidad angular, $[mm]$

z : Nivel de medición de la velocidad angular, $[mm]$

u_ϕ : Velocidad tangencial, $\left[\frac{m}{s}\right]$

Re : Número de Reynolds

Fr : Número de Froude

St : Número de Strouhal

∇ : Gradiente

Ω : Vorticidad

Lista de figuras

Figura 1 Central Guri, Estado Bolívar, al sudeste de Venezuela [7].....	16
Figura 2 Central hidroeléctrica de Itaipú, frontera entre Brasil y Paraguay [7].....	17
Figura 3 Potencial físico hidroenergético de Colombia [2].....	18
Figura 4 Modelo del embalse [10].....	19
Figura 5 Rotor de una planta hidroeléctrica de vórtice [10].....	19
Figura 6 Embalse de la planta hidroeléctrica de vórtice en Schöftland [10].....	20
Figura 7 Prototipo de la PHGV en operación [12].....	21
Figura 8 Desarrollo de flujo laminar a lo largo de un canal horizontal. La vorticidad se hace evidente por la rotación de los objetos pequeños colocados en el flujo [14].....	27
Figura 9 Ejemplo de vórtice irrotacional [14].....	28
Figura 10 Vórtice compuesto [14].....	30
Figura 11 Esquema conceptual dispositivo hidrogenerador de vórtice.....	32
Figura 12 Vista superior de la cámara de vórtice en los hidrogeneradores de fondo plano para (a) dispositivo 1 (e=5 mm), (b) dispositivo 2 (e=6 mm) y (c) dispositivo 3 (e=8 mm).....	33
Figura 13 Vista superior de la cámara de vórtice de (a) dispositivo 4 (d=30 mm), (b) dispositivo 5 (d=40 mm) y (c) dispositivo 6 (d=50 mm) de los hidrogeneradores de fondo cónico.....	34
Figura 14 Vista de las tapas de fondo cónico para los dispositivos apreciándose la diferencia en el diámetro de descarga.....	34
Figura 15 Parámetros asociados a la geometría y al vórtice en el hidrogenerador.....	36
Figura 16 Esquema de la instalación experimental. (a) tanque de almacenamiento de agua, (b) bomba de 0.5 HP, (c) caudalímetro, (d) válvula de compuerta, (e) manguera, (f) dispositivo hidrogenerador de vórtice, (g) pantalla amortiguadora y (h) llave de emergencia.....	37
Figura 17 Visualización de la instalación experimental.....	37
Figura 18 Composición física del montaje experimental, (a) tanque de almacenamiento de agua, (b) bomba de 0.5 HP, (c) caudalímetro, (d) válvula de compuerta, (e) manguera de recirculación de caudal al dispositivo, (f) dispositivo hidrogenerador de vórtice, (g) pantalla amortiguadora del dispositivo para reducir las fluctuaciones de caudal y (h) llave de emergencia.....	38
Figura 19 (a) Disposición del tubo de Pitot durante una medición de velocidad a la entrada de la cámara de vórtice y (b) vista del manómetro en U durante un experimento.....	40

Figura 20 Esquema del correntómetro para vórtice.....	41
Figura 21 Rodamiento y soporte del correntómetro de copas.....	41
Figura 22 Juego de elementos removibles para la variación del radio de los brazos de las copas.....	41
Figura 23 Vista esquemática frontal y superior de un elemento removible del correntómetro de copas.....	42
Figura 24 Partes de un sistema DAQ [17].....	43
Figura 25 Sensor de efecto Hall.....	43
Figura 26 Tarjeta electrónica de sensor de efecto Hall y módulo DAQ....	44
Figura 27 RPM de apoyo en el visualizador de la placa.....	44
Figura 28 Módulo DAQ NI USB-9162.....	45
Figura 29 Visualización en LabVIEW de una medición de velocidad angular.	46
Figura 30 Vista frontal y superior del sistema de agitador magnético de vórtice.....	46
Figura 31 Ejemplo de vórtice generado a 1150 rpm registradas en el visualizador del sistema de agitador electromagnético.....	47
Figura 32 Visualización general del experimento durante una prueba de medición angular.....	48
Figura 33 Visualización de un elemento removible determinado en un nivel fijo en el interior del vórtice.....	49
Figura 34 Visualización general de la medición de la deflexión manométrica estimada con el tubo de Pitot.....	50
Figura 35 Lamina translucida de acrílico de 4 mm de espesor.....	52
Figura 36 Doblado de la lámina en caliente sobre el cilindro molde y ajuste mediante prensas.....	53
Figura 37 Lámina doblada con forma cilíndrica al final.....	53
Figura 38 Asiento del dispositivo hidrogenerador de vórtice.....	53
Figura 39 Dispositivos de fondo plano y cónico físicos.....	54
Figura 40 Visualización del fondo plano y cónico en los dispositivos...	54
Figura 41 Diagrama de verificación del correntómetro de copas.....	57
Figura 42 Velocidad angular en función del radio para el caudal 1 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	70
Figura 43 Velocidad angular en función del radio para el caudal 2 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	71
Figura 44 Velocidad angular en función del radio para el caudal 3 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	72
Figura 45 Velocidad angular en función del radio para el caudal 4 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	73
Figura 46 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 1 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	75

Figura 47 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 2 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	76
Figura 48 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 3 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	77
Figura 49 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 4 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).....	78
Figura 50 Velocidad angular en función del radio para el caudal 1 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	80
Figura 51 Velocidad angular en función del radio para el caudal 2 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	81
Figura 52 Velocidad angular en función del radio para el caudal 3 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	82
Figura 53 Velocidad angular en función del radio para el caudal 4 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	83
Figura 54 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 1 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	85
Figura 55 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 2 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	86
Figura 56 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 3 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	87
Figura 57 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 4 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).....	88
Figura 58 Regiones asociadas al vórtice de estudio.....	91
Figura 59 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región superior.....	92
Figura 60 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región media.....	93
Figura 61 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región inferior.....	94
Figura 62 En un dispositivo de fondo plano (a) vista lateral y (b) vista superior del vórtice.....	95
Figura 63 En un dispositivo de fondo cónico (a) vista lateral y (b) vista superior del vórtice formado.....	95
Figura 64 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región superior.....	96

<i>Figura 65 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región media.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 66 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región inferior.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 67 Trayectoria descrita por una partícula fluida en el vórtice interior.....</i>	<i>99</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1 Control de caudal.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 2 Medidas de los elementos removibles del correntómetro de copas. 42</i>	
<i>Tabla 3 Relaciones de aspecto y tipo de fondo de los hidrogeneradores de vórtice.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 4 Ecuaciones de calibración y coeficiente de correlación para cada elemento removible.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5 Parámetros adimensionales promedio en los dispositivos de fondo plano.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 6 Parámetros adimensionales promedio en los dispositivos de fondo cónico.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 7 Medida de la intensidad para efectos prácticos en los dispositivos de fondo plano.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 8 Medida de la intensidad para efectos prácticos en los dispositivos de fondo cónico.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 1.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 10 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 2.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 11 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 3.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 12 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 4.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 13 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 1.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 14 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 2.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 15 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 3.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 16 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 4.....</i>	<i>117</i>

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables viene en aumento con grandes innovaciones, gracias a las nuevas políticas gubernamentales y a los problemas ecológicos presionando en las conciencias de las personas.

Cada vez hay más iniciativas que no representan un daño considerable al medio ambiente y satisfacen la necesidad para las que fueron desarrolladas. En materia de generación de energía, se han implementado muchas alternativas hacia la generación eficiente de electricidad utilizando energías renovables, logrando impactos ambientales satisfactorios, sustentándose en la reducción de los gases de invernadero y la generación necesaria del recurso.

La generación de energía por medio de recursos hídricos es uno de los objetivos en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica (LMF&H) de la Universidad del Valle, por ello adelanta el desarrollo de un dispositivo intrusivo portable que opere en cualquier canal de flujo libre, concebido para generar energía eléctrica a través de la conversión de la energía mecánica que entrega un vórtice o fluido en rotación que se forma en su interior.

El fenómeno de flujo giratorio se caracteriza por la rotación que experimenta el fluido alrededor de un eje, lo que dificulta su análisis y descripción, pero que aun así, ha sido motivo de investigación en la hidráulica y dinámica de fluidos, por los daños que puede ocasionar o por los beneficios que puede traer, si se aprovecha de manera controlada la energía que concentra [1].

1.2 ANTECEDENTES

Se denomina energía renovable a la energía que se produce de forma natural, cuyo aprovechamiento no agota la fuente de la que se obtiene, es decir, son inagotables y por eso su uso no reduce los recursos existentes. La energía que utilizamos convencionalmente proviene de recursos no renovables (combustibles fósiles), cuyas reservas se agotan a medida que son utilizados [2].

La dependencia del petróleo, el carbón y el gas han generado conflictos políticos y ambientales; por esta razón en los últimos años, se ha hecho necesario invertir en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía que funcionen con recursos renovables. Esto a su vez hace necesario una mejor administración de los recursos locales. Además, en el mundo entero el término renovable se asocia con un medio ambiente más limpio, apropiado para nosotros y las futuras generaciones. Actualmente las energías renovables cubren cerca del 20% del consumo mundial de electricidad [2].

Un estudio encomendado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), pensando en el futuro energético, sostiene que los decrecientes costos y las nuevas tecnologías hacen de los recursos renovables una alternativa viable. Los recursos solares, geotérmicos, hídricos, eólicos, y la biomasa, disponibles en América Latina y el caribe podrían producir hasta 80 petavatios-hora de electricidad [3].

Para que nuestro planeta quede fuera de alerta roja ambiental, la temperatura promedio no debe sobrepasar 2°C más que la actual, o en términos paralelos, la concentración de CO₂ debe permanecer bajo las 450 ppm (partes por millón) [4].

Sin embargo, durante los tres últimos decenios, todas las emisiones de gases de efecto invernadero aumentaron a una media de 1,6% anual con emisiones de CO₂ dimanantes del uso de los combustibles fósiles que creció en 1,9% anual. El mayor incremento de las emisiones de gases de efecto

invernadero se ha registrado en el suministro de energía y el transporte por carretera donde la flota de vehículos del mundo previsiblemente se triplicará para 2050 y 80% de este crecimiento se registrará en los países en desarrollo [5].

Para reducir en 50% las emisiones hacia 2050, el Organismo Internacional de Energía llegó a la conclusión de que habría que limitar las emisiones a 26 gigatoneladas (Gt) para 2030, frente a la expectativa de que alcanzarán las 41 Gt, sino cambian las políticas de producción. El aumento del rendimiento energético representaría el grueso de la reducción de estas emisiones, 54%, seguido de un mayor uso de la energía renovable y la energía nuclear, así como de la captura y el almacenamiento de carbono después de 2020 [5].

Las energías renovables se han clasificado en seis grupos principales como son la energía solar, la energía eólica, la energía de la biomasa, la energía hidráulica, la energía de los océanos y la energía geotérmica. Las investigaciones que se han hecho durante años, en todo el mundo, han permitido evaluar y determinar en qué regiones puede aprovecharse mejor un determinado recurso [2].

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas. La biomasa es la energía proveniente del conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal al ser transformada por medios naturales o artificiales. La energía solar es la energía obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La energía geotérmica es el aprovechamiento del calor interno de la Tierra. La energía mareomotriz se obtiene mediante el aprovechamiento del fenómeno de mareas, y en su generación intervienen las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol [6].

La energía hidráulica es aquella que proviene del agua que se manifiesta como energía cinética en el caudal de las

corrientes y como energía potencial en la altura de las caídas de los ríos [2].

La energía hidráulica es la fuente de energía renovable más utilizada del mundo [7]. La mejor visualización de la utilización de la energía hidráulica son las centrales hidroeléctricas (figuras 1 y 2), tradicionalmente clasificadas por la forma de captación en centrales filo de agua o agua fluyente y centrales de embalse, y por sus características técnicas clasificadas en plantas convencionales, no convencionales y parcialmente convencionales. En estas plantas se utilizan turbinas hidráulicas que pueden ser de acción o de reacción [2].



Figura 1 Central Guri, Estado Bolívar, al sudeste de Venezuela [7].

Las centrales hidroeléctricas cuentan con una capacidad instalada mundial superior a los 1.000 GW, lo que representa más del 16% de la producción neta de electricidad en el mundo y más del 65% de la capacidad de generación de energía mundial a partir de fuentes renovables [7].



Figura 2 Central hidroeléctrica de Itaipú, frontera entre Brasil y Paraguay [7].

La ventaja principal de las centrales hidroeléctricas es que implementa la utilización de un recurso inagotable que no contamina la atmosfera, además, la turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, por otra parte, el embalse puede ser utilizado para el riego, también se cuenta con la protección contra las inundaciones debido a la regulación del caudal y finalmente se puede aprovechar para el turismo [8].

Entre los inconvenientes se encuentra el extenso tiempo de construcción, la influencia de las condiciones meteorológicas que varía de estación a estación y los elevados costos de inversión por kilovatio instalado [9].

Los impactos negativos se centran en la contaminación del aire y del agua como resultado de la construcción y de la eliminación de los desperdicios, la erosión del suelo, destrucción de la vegetación, destrucción de saneamiento, la dislocación de la gente que vive en la zona inundada, pérdida de terreno (agrícola, bosques, pastos, humedales) a causa de la inundación para formar el reservorio, pérdida de propiedades históricas, culturales o ascéticas a raíz de la inundación, todo lo mencionado, dando como parte del resultado final un enorme impacto ambiental. Estos aspectos se intentan atenuar mediante la creación de terrenos utilizables en áreas que, previamente, no eran apropiadas para otras actividades, más un estricto control de la contaminación del aire y agua, una ubicación cuidadosa de los campamentos, edificios, excavaciones, canteras, depósitos de

basura, desechos y las precauciones necesarias para reducir la erosión [8].

El potencial físico hidroenergético de un territorio determinado se toma a partir de las características del mismo como son la esorrentía, caudal o cantidad de agua que el río transporta en un determinado tiempo y la pendiente del terreno, cabeza hidráulica o altura disponible entre el nivel de las superficies del flujo y el lugar inferior de la caída. Colombia, debido a su situación desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos que impliquen aprovechamientos hidráulicos como se muestra en la figura 3 [2].

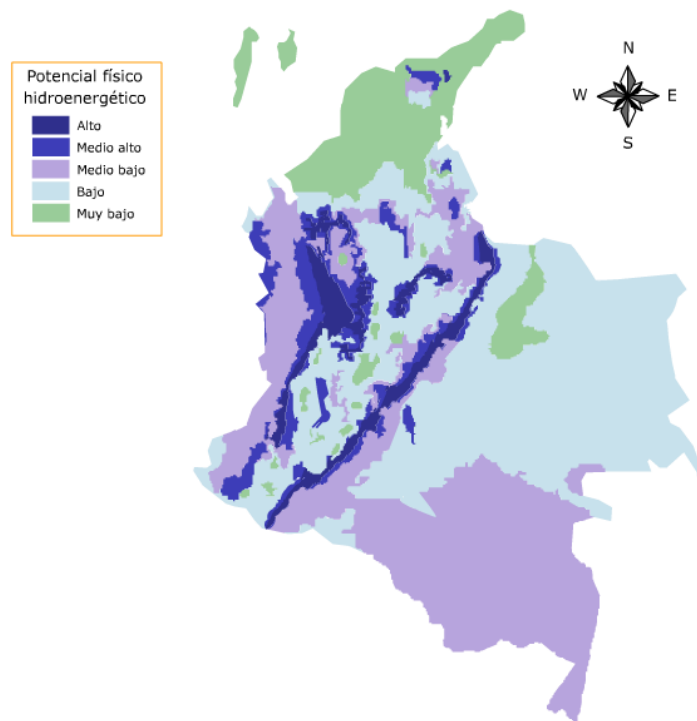


Figura 3 Potencial físico hidroenergético de Colombia [2].

En la actualidad, otro tipo de central hidroeléctrica se abren paso utilizando energía hidráulica. En el año 2009, fue inaugurada en el pueblo de Schöftland (Suiza), una planta hidroeléctrica de vórtice (figura 4) que se dedica a la producción de energía utilizando un remolino [10].

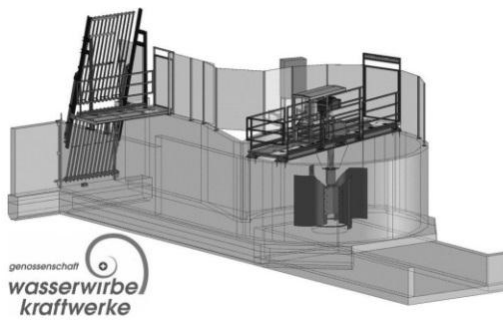


Figura 4 Modelo del embalse [10].

La planta hidroeléctrica de vórtice está configurada para instalarse directamente en el lecho del río. Para su puesta en operación, se requiere un nivel de agua como mínimo de 0.7 metros, haciendo uso de un caudal de al menos 1.000 litros de agua por segundo. Este tipo de central es mucho más pequeña que una central convencional y con una vida útil de entre cincuenta a cien años, además de ser una tecnología de fácil mantenimiento [10].

La generación de energía se produce de manera diferente a como la elaboran las centrales tradicionales. Captando el caudal del río a través de una tubería forzada, se hace llegar a una cámara cilíndrica con un orificio de descarga central, donde se forma un remolino simétrico estable gracias a la gravedad que resulta del desnivel, este remolino mueve un rotor aproximadamente a 20 rotaciones por minuto (figura 5) generando electricidad y conectándola a su vez a la red eléctrica [10].



Figura 5 Rotor de una planta hidroeléctrica de vórtice [10].

Las ventajas de este tipo de central son principalmente que su tecnología es sencilla, su mantenimiento es fácil, su tamaño es reducido, su precio es más asumible y el impacto medioambiental es muy débil, puesto que la mayor parte de la planta se construye bajo tierra. También, aparte de electricidad genera numerosos beneficios para el medio ambiente ya que gracias a los remolinos la concentración de oxígeno aumenta, siendo beneficioso para la ecología acuática, y por otra parte, no supone ningún peligro para los peces ya que pueden atravesarla igual de bien río arriba como río abajo [10].

La planta piloto fue instalada en Schöftland en el cantón de Argovia (figura 6). En su configuración geométrica esta un diámetro de cámara de 6,5 metros y una tubería forzada de 1,5 metros; produce entre 10 y 15 kilovatios, según el nivel del agua. Anualmente produce entre 80.000 y 130.000 kilovatio-hora, lo cual puede cubrir la demanda de 20 a 25 hogares suizos [10].



Figura 6 Embalse de la planta hidroeléctrica de vórtice en Schöftland [10].

Como la planta anterior, existe otra planta Hidroeléctrica Gravitacional de Vórtice (PHGV), desarrollada por el Dipl. Ing. Franz Zotlöterer, la cual opera comercialmente y usa la energía rotacional de un gigantesco vórtice, inicio como una idea para airear el agua del río mientras que ahora se cuenta con un proceso de aireación que además produce energía eléctrica [11], [12].

En su primer año en operación, produjo 50.000 kWh, suficiente para el consumo de 14 casas europeas promedio. Esta planta está ubicada en Obergrafendorf (10 kms al sur oeste de St. Pölten en Austria, Europa central) a lo largo del río Pielach (figura 7) [11].



Figura 7 Prototipo de la PHGV en operación [12].

La planta tiene una carga hidráulica en operación de 1.4 m, un caudal en operación de $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$, el diámetro del tanque de rotación es de 5.5 m, manejando una potencia hidráulica 11,4 kW y una potencia eléctrica 7,5 kW. La eficiencia de la turbina de esta planta hidroeléctrica de vórtice gravitacional es de 80% a $3/3$, 83% a $2/3$ y 64% a $1/3$ del caudal máximo, la eficiencia de la transmisión es 91% y la eficiencia del generador del 90%. Tiene una velocidad de rotación de 33 rpm y una inversión de alrededor de 40.000 €, sin apoyo financiero. Actualmente la generación de electricidad es superior a los 203.000 kWh (septiembre de 2010) [11].

La turbina puede operar a velocidad constante pero también a velocidad variable y su la baja velocidad de rotación elimina el peligro para los peces y microorganismos, además que cuerpos flotantes pequeños pueden atravesar la turbina. Por último, el rodete es manufacturado utilizando hojas de acero curvas ensambladas con pernos. Como detalle adicional se destaca que el costo de la construcción de una planta es la mitad de una instalación hidroeléctrica convencional que cuente con un rendimiento similar [12].

Este proyecto de grado evaluó de una manera preliminar ante la ausencia de teorías explícitas, la intensidad del vórtice de eje vertical formado en un dispositivo experimental de hidrogenerador de vórtice, el cual se compone de una cámara cilíndrica con ducto de alimentación tangencial. Dicha evaluación se realizó manteniendo constante el diámetro de la cámara y variando la razón de aspecto del parámetro geométrico del ancho de la apertura de entrada al cilindro, con respecto al diámetro del orificio de descarga de la cámara.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El uso de flujos giratorios tiene un potencial aplicable a diferentes procesos de ingeniería, que podrían mejorar los existentes, con el fin de propiciar el desarrollo sostenible y cuidado del medio ambiente. Se busca la optimización de un proceso de generación con un dispositivo intrusivo y, por tanto, portátil donde sea aplicable este tipo de flujo, cuyo conocimiento es escaso en la literatura. La idea es innovadora, novedosa y se muestra tan viable como eficaz [12]; así se pretende desarrollar a futuro un dispositivo intrusivo microgenerador de electricidad, orientado fundamentalmente al suministro de energía en zonas no conectadas a la red nacional de distribución de electricidad, que cuenten con corrientes naturales de agua con potencial energético.

A causa de la poca información sobre el flujo rotatorio en cámaras cilíndricas, se adolece de las leyes de semejanza para dimensionar un dispositivo de laboratorio con el cual se obtengan datos experimentales extrapolables a un prototipo. Esta situación dificulta la realización de la investigación acerca del comportamiento del vórtice a usar con fines de generación eléctrica y el proceso de diseño donde se podría aplicar este tipo de tecnología. Por tanto es necesario realizar un análisis dimensional que incorpore los parámetros, tanto geométricos como dinámicos del flujo giratorio, que controlan el problema, a fin de identificar el efecto de la razón de aspecto cuando se mantiene constante el diámetro de la cámara de vórtice.

Finalmente, este estudio se suma al esfuerzo del laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica (LMF&H) de la Universidad del Valle por conocer el campo de la turbomáquinas no convencionales, concebidas de acuerdo a las condiciones de nuestro entorno.

1.4 OBJETIVOS

General

Evaluar la intensidad de un vórtice formado en una cámara cilíndrica con ducto de alimentación tangencial, cuando se mantiene constante el diámetro de la cámara y se varía la razón de aspecto.

Específicos

- Construir en acrílico tres dispositivos experimentales de fondo plano y cónico, con diámetro de cámara de vórtices constante y diferentes relaciones ancho de apertura de alimentación a diámetro del orificio de descarga.
- Calibrar un correntómetro de copas para medir la velocidad de giro, usando como patrón de referencia un agitador de vórtice electromagnético.
- Realizar un análisis dimensional que asocie los parámetros geométricos del dispositivo y las propiedades y variables del flujo giratorio.
- Evaluar los parámetros obtenidos del análisis dimensional usando información experimental.
- Encontrar el sentido físico de los parámetros gobiernan el comportamiento del vórtice a partir de los datos experimentales obtenidos.

2.1 REVISION DE LITERATURA

En general, para cualquier fenómeno que involucre un fluido en movimiento se requieren postulados y leyes físicas que deben ser descritos a partir de tres principios básicos: conservación de la masa, momentum y energía. Estas ecuaciones han sido deducidas de forma general y su estudio es complejo, por lo que se requiere de ciertas suposiciones o simplificaciones que permitan una descripción del flujo.

Para obtener estas ecuaciones se emplea la hipótesis del medio continuo, la cual ignora las moléculas individuales, considerando al fluido como un conjunto de materia continua en donde cada variable estudiada tendrá un único valor en un campo de variables, lo cual permite usar el cálculo diferencial e integral [13].

En la teoría de vórtices, se emplean la ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes deducidas a partir de las leyes de conservación de la masa y el momentum respectivamente.

Se implementa también para el análisis dimensional el método fundamental, el Teorema de π (pi) de Vaschy-Buckingham.

Ecuación de continuidad y ecuación de Navier-Stokes

Las leyes de la mecánica, incluyendo conservación de masa y las leyes de movimiento de Newton, pueden ser aplicadas a un fluido. Las formulaciones resultantes proveen la matemática básica para el modelamiento del flujo de un fluido. Las ecuaciones necesarias para el modelamiento de un flujo son la ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes o leyes de movimiento [14].

La ecuación de continuidad es una expresión que representa la idea de que la materia es conservada en un flujo.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación es deducida mediante el análisis de un volumen infinitesimal para la densidad y la velocidad en las tres direcciones del flujo.

La ecuación de Navier-Stokes describe el movimiento de un fluido. Esta ecuación gobierna la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{F} - \nabla P + \mu \left(\frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla^2 \mathbf{u} \right) \quad (2)$$

Vorticidad y Circulación

La vorticidad describe la rotación de las partículas fluidas, condición que está casi siempre presente en un fluido en movimiento aunque no pueda ser evidente. La condición de no deslizamiento es uno de los mecanismos más importantes en la generación de vorticidad siendo el mecanismo responsable de su generación la viscosidad [14]. También la vorticidad es un concepto matemático que desde la dinámica de fluidos está ligada a la cantidad de circulación o rotación de un fluido, y se define como la circulación por unidad de área en un punto del flujo. La presencia de vorticidad en un fluido siempre implica la rotación de las partículas fluidas, acompañada o no de alguna deformación transversal y se origina fundamentalmente en los contornos sólidos debido a que los fluidos no son capaces de deslizarse sobre ellos [14].

Un entendimiento de vorticidad en flujos donde la rotación no es evidente puede ser desarrollado considerando un flujo uniforme laminar de un fluido viscoso en un ducto. Cuando el flujo está completamente desarrollado, tendrá una distribución de velocidades parabólica. Marcas de tinta en el flujo podrían mostrar movimiento en línea recta, indicando

líneas de corriente rectas. Sin embargo, si objetos pequeños como corchos reducidos, fueran colocados en el flujo, rotarían al tiempo que se trasladan a lo largo de un camino recto como lo indican los círculos semirelLENOS en la figura 8 [14].

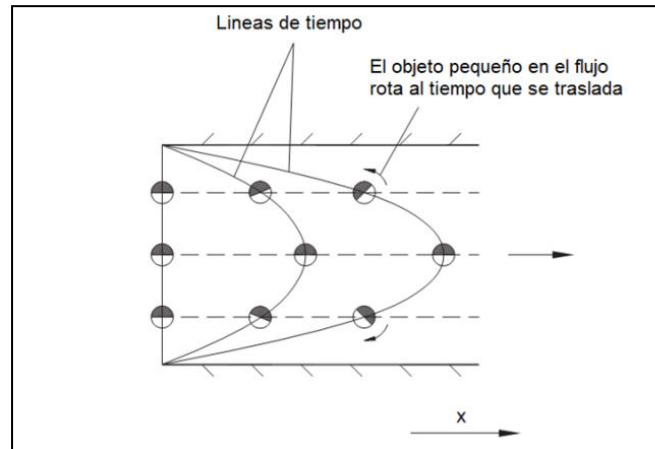


Figura 8 Desarrollo de flujo laminar a lo largo de un canal horizontal. La vorticidad se hace evidente por la rotación de los objetos pequeños colocados en el flujo [14].

Esto significa que el flujo tiene vorticidad y que el mecanismo físico responsable es la viscosidad. En la pared las partículas del fluido tendrán velocidad cero debido a la condición de no deslizamiento. A una distancia pequeña de la pared el fluido tiene una componente de velocidad axial mayor. Mediante la acción de la viscosidad, esta diferencia resulta en una variación del esfuerzo cortante a través de un elemento de fluido, que causa la rotación local en un elemento de fluido [14].

Por otra parte, un vórtice se utiliza para definir una región de flujo en rotación, como un remolino, un torbellino, o la depresión en el centro de un fluido girando. Desde el punto de vista de la vorticidad, hay dos tipos fundamentales de vórtices planos (aquellos cuyas líneas de corriente son círculos concéntricos): irrotacional (cuando sus partículas no giran sobre sus ejes centroidales, figura 9) y rotacional (si las partículas fluidas rotan sobre sus ejes centroidales) [14].

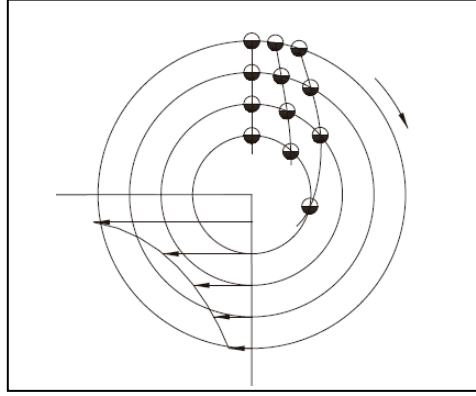


Figura 9 Ejemplo de vórtice irrotacional [14].

Así, todo flujo que considere la rotación y translación de las partículas tiene implícita vorticidad y circulación, cumpliéndose que en la frontera solida las partículas de fluido tienen velocidad nula debido a la condición de no deslizamiento [14].

En términos matemáticos, la circulación se define como la integral de la velocidad tangencial a lo largo de una curva cerrada fija en el flujo.

$$\Gamma = \oint \mathbf{u} \cdot d\mathbf{l} \quad (3)$$

donde $\mathbf{u}$ es la velocidad tangencial y $d\mathbf{l}$ el vector desplazamiento a lo largo del borde de un elemento de fluido.

En coordenadas cilíndricas (r, θ, z) sólo hay un componente del campo de velocidades (u_θ) . En el cálculo de la circulación, el elemento de línea $d\mathbf{l} = r d\theta \hat{\theta}$, De modo que $\mathbf{u} \cdot d\mathbf{l} = u_\theta r d\theta$.

Así la estimación de la circulación como medida de la intensidad del vórtice se realizó en coordenadas cilíndricas con base en la velocidad angular media del vórtice que fue supuesto para efectos prácticos como forzado y el mayor radio de medición de la siguiente manera.

$$\Gamma = \oint_s u_\theta r d\theta = \int_0^{2\pi} (\omega r) r d\theta = 2\pi(\omega r)r \quad (4)$$

Para nuestro estudio, una partícula de fluido que rota sobre un plano localizado a una distancia r y tiene una velocidad angular ω , posee una velocidad tangencial de la siguiente forma.

$$u_{\phi} = \omega \cdot r \quad (5)$$

Vórtice libre, forzado y de Rankine

Desde el punto de vista de la vorticidad, hay dos tipos de vórtices, vórtice libre o irrotacional y vórtice forzado o rotacional.

En un vórtice libre la velocidad tangencial está dada por

$$u_{\phi} = \frac{C}{r} \quad (6)$$

es decir,

$$(\omega r)r = C \quad (7)$$

donde "C" se conoce como la intensidad del vórtice en cualquier radio r . Así, teóricamente la velocidad se convierte infinita en el centro, lo que no es congruente con la realidad, por este motivo, el análisis presentado por un vórtice libre generalmente se utiliza solamente para las regiones fuera del núcleo central [14].

En un vórtice forzado, la velocidad tangencial a un radio R es

$$u_{\phi} = \omega R \quad (8)$$

siendo ω la velocidad angular de la partícula de fluido.

El vórtice forzado es conocido también como vórtice volante de inercia, porque todo el fluido gira esencialmente como un cuerpo sólido (rígido). La energía asociada con las líneas de corriente en un vórtice forzado aumenta al aumentar el radio.

El flujo en un vórtice forzado sólo puede mantenerse por la adición de energía de alguna fuente externa [14].

Para el caso de interés, el vórtice será asumido como vórtice compuesto o de Rankine, que se compone de un vórtice libre exterior y un vórtice forzado interior en el cual la velocidad en el radio común debe ser igual, para evitar una discontinuidad en la velocidad [14].

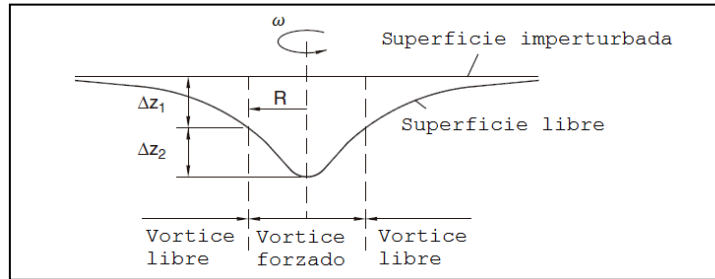


Figura 10 Vórtice compuesto [14].

El radio donde confluyen ambos vórtices es

$$R = \sqrt{\frac{C}{\omega}} \quad (9)$$

En consecuencia, con este enfoque a lo sumo se aspira a un modelo matemático restringido por las hipótesis necesarias para linealizar el problema con miras a una solución exacta.

El fenómeno del vórtice ha sido el centro de múltiples experimentos para su descripción. Por tal motivo, la solución de este tipo de problemas implica una combinación de la información analítica y de la experimental [15]. Para ello en este estudio se hizo uso del análisis dimensional por ser una herramienta importante que permite reducir el número y la complejidad de las variables que intervienen en la descripción de algún fenómeno físico dado, existiendo para ese fin diferentes técnicas [13].

Teorema de pi Buckingham

El análisis dimensional es en esencia un método de adimensionalización que se utiliza para simplificar el estudio de cualquier fenómeno y poder analizarlo con mayor facilidad, donde el proceso sin el análisis se vuelve arduo y arbitrario, para la investigación se hizo uso del Teorema de π (pi) de Vaschy-Buckingham por ser este el teorema fundamental del análisis dimensional [16].

La aplicación del teorema sigue los siguientes pasos:

1. Se identifican las variables relacionadas en el problema con sus respectivas dimensiones (masa, longitud, tiempo y temperatura o fuerza, longitud, tiempo y temperatura).
2. Se escogen las variables que no puedan formar un grupo adimensional, estas son llamadas variables estables. Esta elección depende mucho de la experiencia del experimentador. Generalmente en análisis dimensionales para experimentos de mecánica de fluidos se escoge una propiedad del fluido, una característica del flujo y una dimensión geométrica importante.
3. Se adiciona una variable del resto al grupo de variables estables, luego se forma un producto de potencias, para el cual se encuentran los valores de los exponentes que forman el producto adimensional, de manera algebraica. De la misma manera se repite este procedimiento secuencialmente con una variable nueva cada vez hasta hallar todos los grupos adimensionales requeridos.
4. Finalmente se debe corroborar que los parámetros encontrados sean adimensionales y escribir la función adimensional resultante.

3.1 METODOLOGIA

Descripción del dispositivo

Un dispositivo hidrogenerador de vórtice se supone como una configuración geométrica orientada a la formación de un vórtice en su interior. Está compuesto por un cilindro vertical con una ranura tangencial, un tanque de alimentación, un canal semiconvergente para conducir el flujo a la entrada del cilindro, asiento único de fondo común al tanque y al canal y una tapa plana o cónica, con orificio de descarga en el centro, ubicada en la base inferior del cilindro (figura 11).

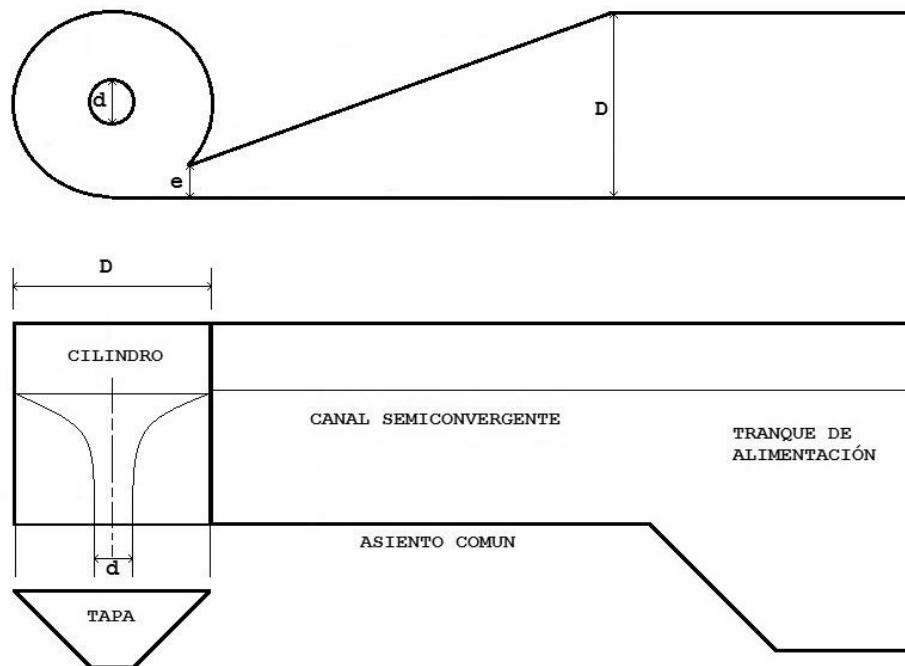


Figura 11 Esquema conceptual dispositivo hidrogenerador de vórtice.

El canal, con sección transversal decreciente, termina en un orificio rectangular tangente al cilindro, desde donde se alimenta el fluido, para formar por el efecto combinado de la

entrada tangencial y del orificio de descarga, un vórtice en su interior.

De las características geométricas del dispositivo, dos fueron objeto de estudio: el parámetro de ancho de la apertura de la entrada tangencial "e" y el diámetro del orificio de descarga "d"; a la razón de los dos se llamó relación de aspecto "e/d".

También, se evaluaron experimentalmente tres configuraciones de fondo plano, para igual número de relaciones de aspecto, así como de la misma manera, fueron ensayadas tres configuraciones de fondo cónico.

Para los dispositivos hidrogeneradores de fondo plano la variación de la geometría se centró en el cambio del parámetro "e", como se ilustra en la figura 12 donde las medidas están en milímetros.

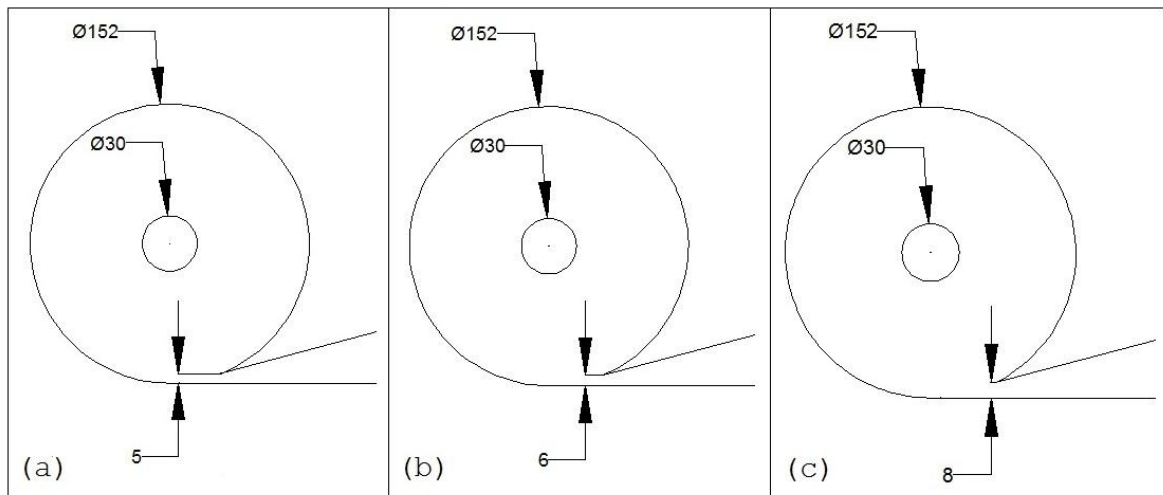


Figura 12 Vista superior de la cámara de vórtice en los hidrogeneradores de fondo plano para (a) dispositivo 1 (e=5 mm), (b) dispositivo 2 (e=6 mm) y (c) dispositivo 3 (e=8 mm).

En los dispositivos de fondo cónico la variación de la geometría se centró en el cambio del parámetro "d" como lo muestran las figuras 13 y 14 (medidas en mm).

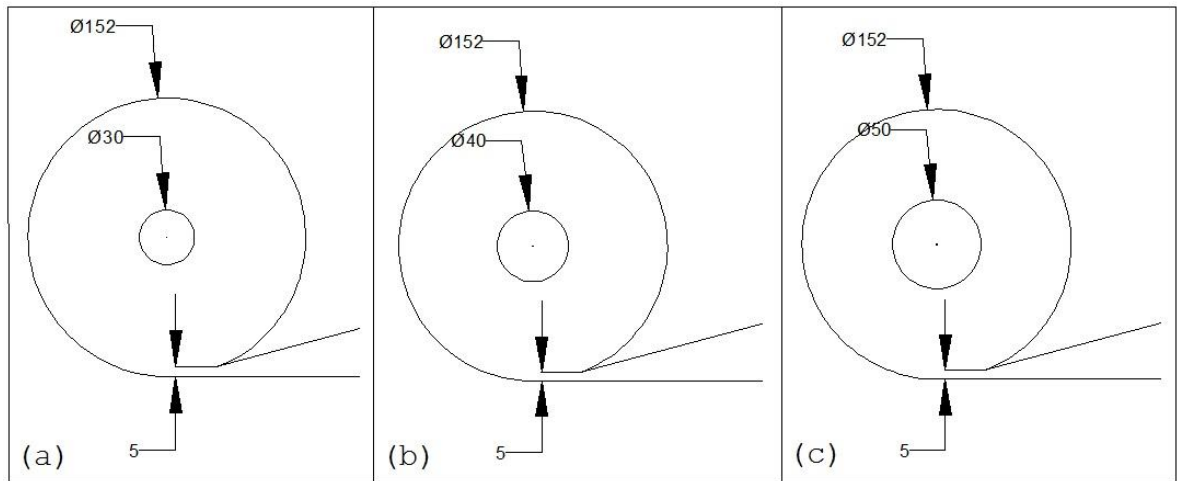


Figura 13 Vista superior de la cámara de vórtice de (a) dispositivo 4 ($d=30$ mm), (b) dispositivo 5 ($d=40$ mm) y (c) dispositivo 6 ($d=50$ mm) de los hidrogenadores de fondo cónico.



Figura 14 Vista de las tapas de fondo cónico para los dispositivos apreciándose la diferencia en el diámetro de descarga.

Los parámetros asociados al hidrogenador de vórtice son los siguientes.

Factores asociados a la geometría

- Ancho de la apertura de la entrada tangencial (e): La cámara de vórtice tiene una entrada tangencial, que permite la entrada del fluido a la cámara en flujo libre.
- Diámetro (D) del cilindro: Diámetro máximo de la cámara que confina el vórtice.
- Diámetro del orificio de descarga (d): Está ubicado en la parte inferior de la cámara de vórtice.
- Altura de la cámara de vórtice (H): Define la altura de la frontera sólida que contiene al vórtice.

Factores asociados a las propiedades del fluido

- Densidad del agua (ρ): Se considera constante en el análisis dimensional (Flujo incompresible).
- Viscosidad (μ): Se mantendrá constante puesto que la temperatura del agua se mantiene constante durante los experimentos.

Factores asociados al vórtice

- Velocidad media tangencial de entrada a la cámara de vórtice (V_0): Velocidad media del flujo incidente que forma el vórtice.
- Velocidad angular (ω): La cámara al ser de geometría cilíndrica induce una rotación al fluido, y por ende una velocidad angular.
- Intensidad del vórtice (Γ): La circulación es la medida de la intensidad del vórtice.
- Gravedad (g): Participa en la formación del vórtice.
- Diferencia del tirante del canal y el vórtice (Δh): Es la diferencia de la altura de la superficie libre en el canal y del vórtice en el cilindro.
- Radio de medición de la velocidad angular (r): Es la distancia desde el eje de giro donde se mide la velocidad angular, a un punto del vórtice.
- Nivel de medición (z): Es la altura de medición de los radios sobre el dispositivo, medida desde la frontera H hacia abajo y de igual manera, en la medición de la velocidad en la apertura de entrada, es la altura de medición desde la frontera H hacia abajo hasta la punta del tubo de Pitot.

A continuación se muestran los parámetros asociados a la geometría y al vórtice en el dispositivo por medio de la figura 15.

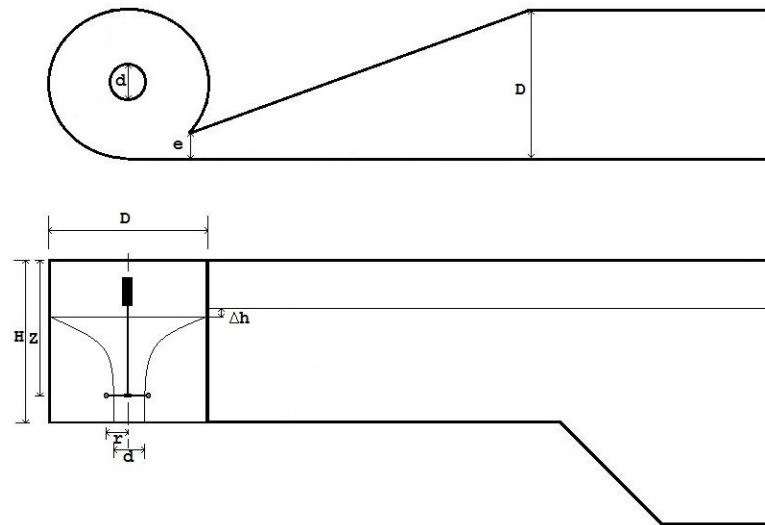


Figura 15 Parámetros asociados a la geometría y al vórtice en el hidrogenerador.

Análisis dimensional

El análisis dimensional es una herramienta muy útil que disminuye el número y complejidad de las variables que describen un fenómeno físico. Básicamente el análisis dimensional parte de la siguiente expresión:

$$j = n - k \quad (10)$$

donde:

n , Variables dimensionales

k , Variables adimensionales a las que se reduce el problema o fenómeno físico.

j , A menudo es igual al número de dimensiones independientes que presenta el problema. En mecánica de fluidos, las cuatro dimensiones básicas se toman generalmente como la masa M , la longitud L , el tiempo T y la temperatura θ , pero algunas veces se utiliza la fuerza F , en reemplazo de la masa.

La relación funcional tiene como variable dependiente la velocidad angular y se expresa de la siguiente manera.

$$\omega = f(e, V_o, d, \Delta h, g, \mu, \rho, r, z) \quad (11)$$

Los análisis dimensionales de los dispositivos de fondo cónico y plano a partir de la relación funcional se realizan en el capítulo siguiente.

Instalación experimental

Los experimentos realizados en los dispositivos hidrogeneradores de vórtice se desarrollaron en un montaje experimental como se muestra en el esquema de la figura 16. La instalación física se muestra en las figuras 17 y 18.

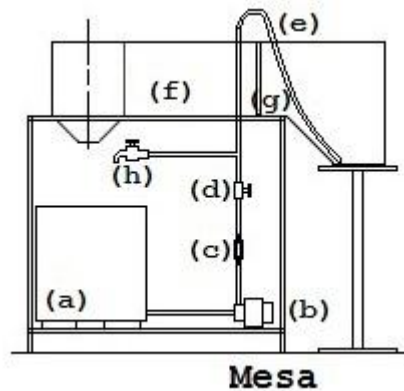


Figura 16 Esquema de la instalación experimental. (a) tanque de almacenamiento de agua, (b) bomba de 0.5 HP, (c) caudalímetro, (d) válvula de compuerta, (e) manguera, (f) dispositivo hidrogenerador de vórtice, (g) pantalla amortiguadora y (h) llave de emergencia.



Figura 17 Visualización de la instalación experimental.

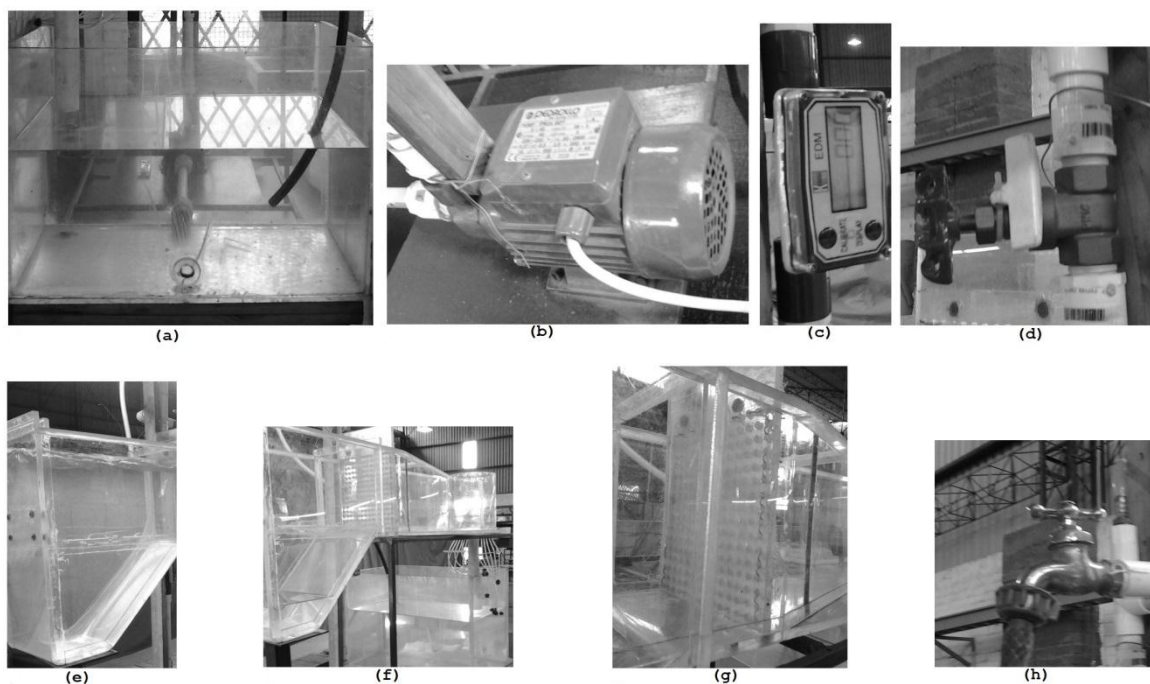


Figura 18 Composición física del montaje experimental, (a) tanque de almacenamiento de agua, (b) bomba de 0.5 HP, (c) caudalímetro, (d) válvula de compuerta, (e) manguera de recirculación de caudal al dispositivo, (f) dispositivo hidrogenerador de vórtice, (g) pantalla amortiguadora del dispositivo para reducir las fluctuaciones de caudal y (h) llave de emergencia.

Control de caudal

La condición esencial para registrar la velocidad de incidencia a la cámara o la velocidad angular, es la presencia del estado estacionario. La forma de llegar a él se centró en el control del caudal por medio de la válvula de compuerta.

El ejercicio del control del caudal se basa en la apertura intencional de la válvula de compuerta, y la verificación del caudal deseado en el visualizador del caudalímetro. De modo que, durante los experimentos, los caudales mostrados en el visualizador variaron de la siguiente manera (tabla 1).

Tabla 1 Control de caudal.

Caudal	Q (LPM)	Incertidumbre	Estado de valvula
1	22.0	0.12	Completamente abierta
2	18.6	0.26	Cerrada 4.00 vueltas
3	14.8	0.53	Cerrada 4.15 vueltas
4	9.37	0.69	Cerrada 4.30 vueltas

En los experimentos, el estado de la válvula de compuerta que determina el caudal de trabajo se describió como caudal 1, caudal 2, caudal 3 y caudal 4 respectivamente para la no alusión de las magnitudes.

Instrumento de medición de la velocidad del flujo incidente a al cilindro

Para la medición de la velocidad de entrada al cilindro se empleó un tubo de Pitot estático, conectado a un manómetro en U, siendo el líquido manométrico usado cloruro de metileno ($D_m=1.41$). Se determinó la velocidad a la entrada de la cámara de vórtice a diferentes profundidades, aplicando la ecuación (14). La disposición del tubo en el dispositivo se evidencia en la figura 19.

$$V = \sqrt{2gR'(D_m - 1)} \quad (12)$$

donde:

R' : Deflexión manométrica

g : Gravedad

D_m : Densidad relativa del líquido manométrico

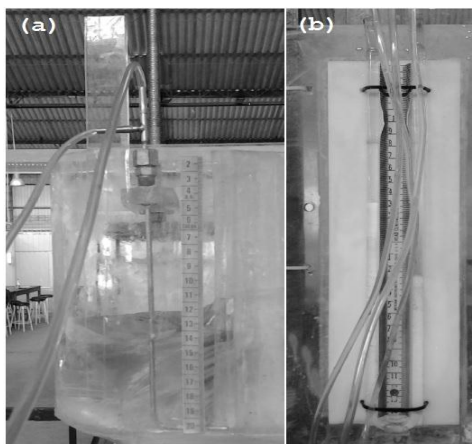


Figura 19 (a) Disposición del tubo de Pitot durante una medición de velocidad a la entrada de la cámara de vórtice y (b) vista del manómetro en U durante un experimento.

Instrumento de medición de la velocidad angular

La estimación de la velocidad angular, exigió el uso del principio estructural y constructivo de los anemómetros de copas que se usan para las estimaciones de la velocidad del viento. Este instrumento para contar el número de revoluciones en un determinado periodo de tiempo, se llamó correntómetro para vórtice y consta de: a) un sensor de efecto Hall (4 en la figura 20), b) una tarjeta electrónica diseñada para transmitir la señal del sensor que detecta el giro, c) un rodamiento de disco duro (2 en la figura 20) unido a un eje rígido superior y con cambio de sección inferior para d) un elemento removible (1 en la figura 20) que varía el radio del brazo de sus copas para la medición (figura 22), d) un imán (3 en la figura 20) adherido al rodamiento del correntómetro, d) un soporte para el eje que controla el nivel de la medición y e) el módulo de adquisición de datos (DAQ). El rodamiento utilizado en el eje del correntómetro mostrado en la figura 21, es el mismo que utilizan los discos duros que giran alrededor de 5000 y 8000 rpm garantizando una fricción mínima que ayuda a una buena medición, los elementos removibles son hechos en fibra de carbono haciéndolos de peso mínimo para un menor momento de inercia, esto reduce los tiempos de adquisición de los datos.

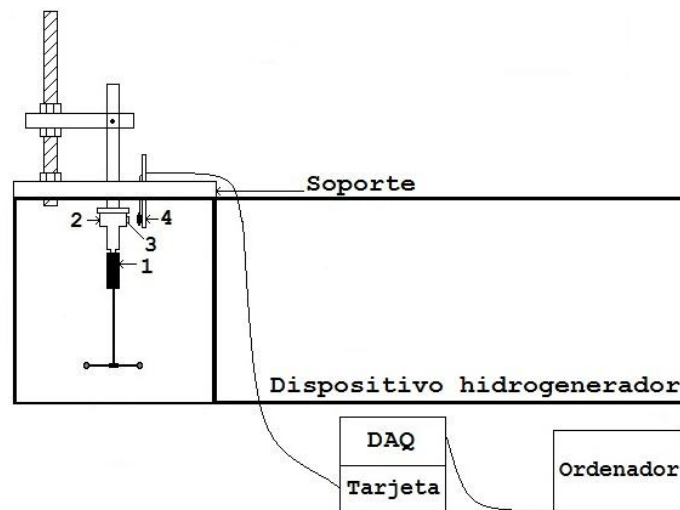


Figura 20 Esquema del correntómetro para vórtice.

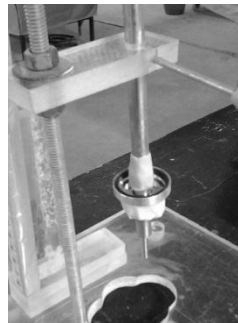


Figura 21 Rodamiento y soporte del correntómetro de copas.

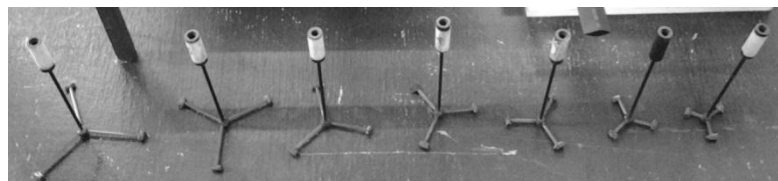


Figura 22 Juego de elementos removibles para la variación del radio de los brazos de las copas.

El correntómetro de vórtice hizo uso de un total de siete elementos removibles para la medición de la velocidad angular, la característica principal de cada elemento removible era que cada uno tenía un radio de brazo diferente como se muestra en la tabla 2.

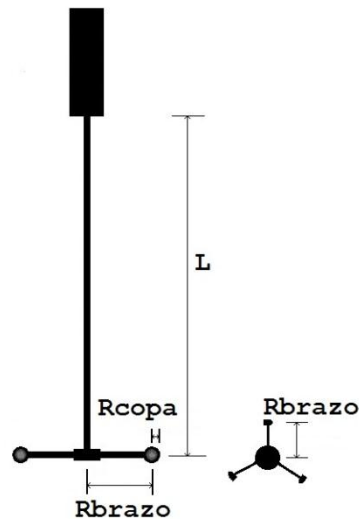


Figura 23 Vista esquemática frontal y superior de un elemento removible del correntómetro de copas.

Tabla 2 Medidas de los elementos removibles del correntómetro de copas.

Elemento removible	L (mm)	Incertidumbre	Rbrazo (mm)	Incertidumbre	Rcopa (mm)	Incertidumbre	Peso (g)
1	91.6	0.80	16.5	0.22	4.46	0.18	4.80
2			19.9	0.15			4.90
3			26.0	0.30			4.90
4			30.5	0.31			5.00
5			35.1	0.36			5.10
6			39.7	0.12			5.30
7			46.5	0.53			5.50

La adquisición de datos (DAQ) se implementó en la medición de la velocidad angular. Mediante un sistema DAQ que consistió de un sensor Hall, un hardware de medidas DAQ y un ordenador con software programable (figura 24). Este sistema comparado con los sistemas de mediciones tradicionales, es mucho más eficiente y aprovecha las habilidades de conectividad de los ordenadores estándares para proporcionar una solución de medidas más potente, flexible y rentable [17].



Figura 24 Partes de un sistema DAQ [17].

En primera instancia, la medida del fenómeno físico (la velocidad angular), comienza con un sensor, también llamado un transductor, este convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ [17].

En el caso de estudio, se utilizó un sensor Hall UGN 3503 como se muestra en la figura 25 [18], que hace uso del efecto hall, descubierto por Edwin C. Hall en 1879, este efecto consiste en la producción de una caída de voltaje a través de un conductor o semiconductor con corriente, bajo la influencia de un campo magnético externo. Para esto es necesario que el campo magnético sea perpendicular al flujo de la corriente [19].

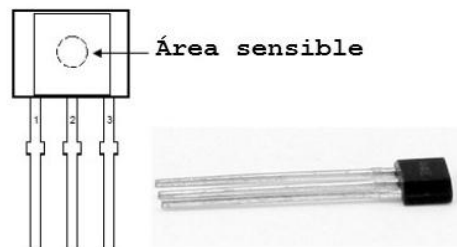


Figura 25 Sensor de efecto Hall.

En el correntómetro de vórtice, el sensor de efecto hall sale de la tarjeta electrónica que está configurada para captar, amplificar, visualizar y medir la señal de posición perteneciente a la velocidad angular (figura 26).

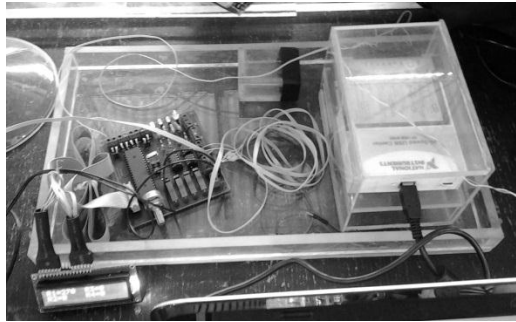


Figura 26 Tarjeta electrónica de sensor de efecto Hall y módulo DAQ.

Cuando el sensor se posiciona en frente al imán adherido al rodamiento, en la tarjeta electrónica se enciende un led que luego se apaga al alejarse del imán, esto sirve para visualizar el buen funcionamiento del sensor y que se está generando la señal de posición. Por otra parte, después de un periodo de tiempo, la tarjeta arroja un dato de referencia de la velocidad angular que se muestra en el visualizador en unidades de rpm (figura 27). Además, el correntómetro permite el funcionamiento de cuatro sensores al tiempo.



Figura 27 RPM de apoyo en el visualizador de la placa.

En segunda instancia, el hardware DAQ actúa como la interfaz entre el ordenador y la señal del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un ordenador pueda interpretarlas [17]. El módulo DAQ utilizado en la medición es el NI USB-9162 (figura 28) [20].



Figura 28 Módulo DAQ NI USB-9162.

Por último, un ordenador con software programable controló la operación del dispositivo DAQ y procesó, visualizó y almacenó los datos medidos. Diferentes tipos de ordenadores son usados en diferentes tipos de aplicaciones [17]. Para el caso una laptop se utilizó por su portabilidad.

El procesamiento y visualización de los datos se percibieron a través de LabVIEW (figura 29), que es una plataforma de programación gráfica [17]. Para terminar, se utilizó EXCEL para reducir los datos y obtener la velocidad angular buscada.

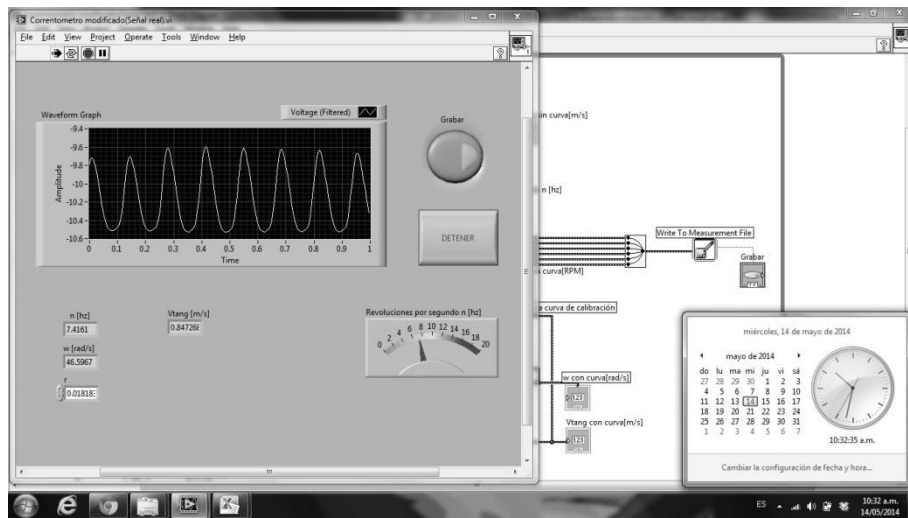


Figura 29 Visualización en LabVIEW de una medición de velocidad angular.

Verificación del correntómetro

Debido a que las condiciones de funcionamiento del correntómetro se basan en un movimiento de rotación, se verificó su comportamiento en operación bajo el mismo tipo de movimiento. Para eso, se hizo uso de un agitador de vórtice magnético el cual genera un movimiento rotatorio en un recipiente, usualmente de vidrio, con un volumen determinado de agua (figuras 30 y 31) [21].

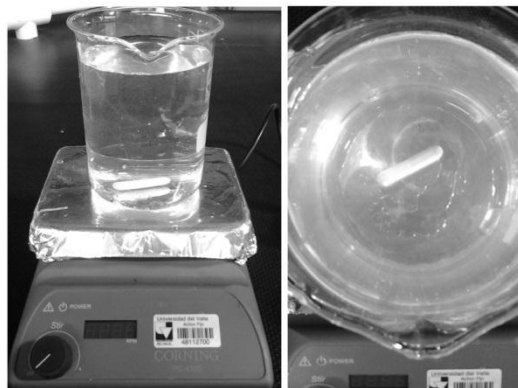


Figura 30 Vista frontal y superior del sistema de agitador magnético de vórtice.



Figura 31 Ejemplo de vórtice generado a 1150 rpm registradas en el visualizador del sistema de agitador electromagnético.

Procedimiento experimental

Después de la respectiva calibración del correntómetro de copas, se hizo una serie organizada de experimentos en la instalación construida, donde se midieron la velocidad en el ducto de alimentación a la cámara de vórtice utilizando el tubo de Pitot y la velocidad angular del vórtice utilizando el correntómetro.

La adquisición de datos se realizó en estado estacionario con cuatro caudales controlados con la válvula de compuerta ubicada a la salida de la bomba, que se verificaban con el caudalímetro.

Por las condiciones medioambientales del laboratorio las pruebas se hicieron en horas de la mañana en períodos no mayores a cuatro horas, debido al cansancio físico que se genera después del trabajo continuo y a que después de alrededor de 5 horas se sobrecalienta el agua por la acción prolongada de la bomba produciendo cambios en su viscosidad, los cuales se querían evitar.

Los datos se procesaron en hoja de cálculo de Excel después de cada prueba. Cualquier retraso del experimento en cuanto al cronograma fue informado por escrito mediante una adenda a la vez que todos los avances se registraron también.

Los experimentos fueron los mismos para los seis dispositivos generadores de vórtice.

Adquisición de la velocidad angular

La velocidad angular se midió cuando se alcanzaba el estado estacionario en diferentes radios (r) dentro del vórtice con el correntómetro, a niveles con diferencias de altura de 10 mm entre ellos (Δz). Una vez tomada una muestra de velocidad angular, se varió el caudal y se esperó el tiempo prudencial para alcanzar un nuevo estado estacionario con otro caudal, pero manteniendo el nivel para proceder a obtener los datos de la nueva condición hidrodinámica.

Una vez definido el nivel y acoplado el elemento removible respectivo como se ve la figura 33, la adquisición de datos en los cuatro caudales tomo alrededor de quince minutos. Por otra parte, montar cada día el experimento toma treinta minutos tanto para colocar la instrumentación como se evidencia en la figura 32, como en el desmontaje de la misma para guardarla en su respectivo espacio.

El sistema de adquisición permitía registrar un dato por cada segundo y se tomó una muestra de 60 segundos; para su análisis posterior se tomó el valor medio de la muestra.



Figura 32 Visualización general del experimento durante una prueba de medición angular.



Figura 33 Visualización de un elemento removible determinado en un nivel fijo en el interior del vórtice.

Adquisición de la velocidad a la entrada de la cámara

Cuando se alcanzaba el estado estacionario, después de drenar las burbujas encontradas en el interior de las mangueras que vienen del tubo de Pitot, éstas se acoplaron simultáneamente en el manómetro en U y se esperó un tiempo alrededor de 10 minutos para la toma de la muestra (figura 34). La deflexión manométrica registrada por el manómetro fue el dato que se introdujo en la ecuación respectiva para la estimación de la velocidad en el nivel de medición. Este procedimiento se repitió cada vez que se quería determinar la velocidad del flujo incidente al cilindro.



Figura 34 Visualización general de la medición de la deflexión manométrica estimada con el tubo de Pitot.

4.1 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos adquiridos en los experimentos realizados con los dispositivos generadores de vórtices construidos y caracterizados por sus respectivas relaciones de aspecto, permitieron una visualización del comportamiento del vórtice generado en este tipo de cámaras. Su procesamiento permitió encontrar una tendencia bajo cada relación de aspecto.

Se observa un aumento de la velocidad en la apertura de alimentación a mayor profundidad y un incremento de la velocidad angular del vórtice cuando decrece el radio del elemento removible del correntómetro.

Este capítulo muestra la consecución de los objetivos en su orden respectivo. Comienza con los pasos para la construcción de los dispositivos hidrogeneradores de vórtice. Luego es presentada la curva de verificación experimental del correntómetro para vórtice. Después, se muestra el procedimiento para la consecución de los análisis dimensionales para cada tipo de dispositivo. Posteriormente, se describe sentido físico de los parámetros que gobiernan el comportamiento del vórtice, esto como complemento junto al análisis y finalmente la evaluación de los parámetros obtenidos del análisis dimensional, lo cual se realizó para efectos de aplicación. Todo lo anterior para satisfacer el objetivo general.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS GENERADORES DE VÓRTICE

El dispositivo hidrogenerador de vórtice tiene como fin visualizar experimentalmente, que tan intrusivo y, por tanto, portátil puede llegar a ser en un futuro la generación de energía trasladable a través de esta estructura inducida del flujo.

Se desarrollaron seis dispositivos: tres de fondo plano y tres de fondo cónico, caracterizados por sus relaciones de aspecto. Los planos referentes a los dispositivos se encuentran en la sección 6.3, donde se presentan los ANEXOS como planos de los dispositivos hidrogeneradores de vórtice de fondo plano y cónico.

La formación del vórtice generado no requiere un caudal específico; sin embargo, se determinó que fuera lo suficientemente grande para la visualización de un vórtice robusto que tuvieran menores influencias en su hidrodinámica por la presencia intrusiva de las herramientas utilizadas en las mediciones.

La estructura fue construida en lámina translúcida de acrílico de 4 mm (figura 35). Para poder conseguir la curvatura cilíndrica se implementó la aplicación de calor sobre la zona a doblar mediante el contacto del acrílico con agua a alta temperatura, modificando las propiedades físicas del material para que adapte la forma deseada.

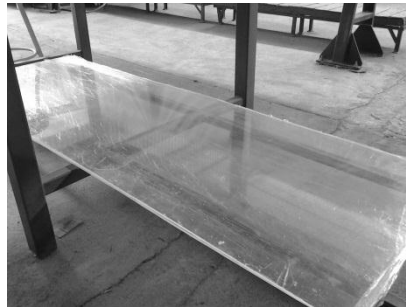


Figura 35 Lamina translúcida de acrílico de 4 mm de espesor.

Luego del contacto con el agua a alta temperatura, se sujeta el material a un cilindro molde de material resistente al calor y a la adhesión de este con el acrílico por medio de un prensado general como se aprecia en la figura 36 y 37.

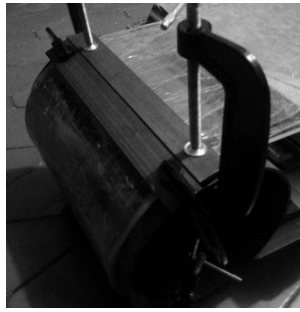


Figura 36 Doblado de la lámina en caliente sobre el cilindro molde y ajuste mediante prensas.



Figura 37 Lámina doblada con forma cilíndrica al final.

Para la zona del asiento, puesto que el doblado es más localizado, puede realizarse la aplicación de calor utilizando un reflector de 500 W (figura 38).

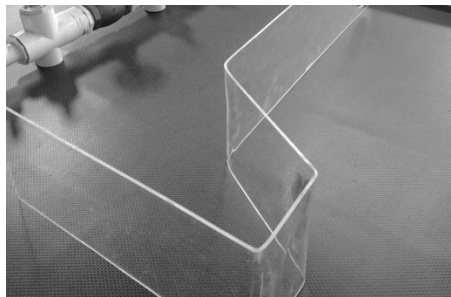


Figura 38 Asiento del dispositivo hidrogenerador de vórtice.

Una vez terminado el cilindro y el asiento, se realizan los bisels necesarios para el empuje correspondiente de cada parte del dispositivo, el elemento usado como pegante entre las partes es el cloruro de metileno. Se destaca que las herramientas usadas para la construcción de los dispositivos son las comunes dentro de cualquier actividad de manufactura

básica, como lo son calibrador, escuadras, segueta, flexómetro, compas, prensas, platinas, limas, lijas, alicate, mototool, silicona, taladro y sierra de mesa para los cortes más prolongados, las medidas de protección básicas son guantes y careta.

Se aprecian dos de los dispositivos de fondo plano y cónico listos para la experimentación en las figuras 39 y 40. Además, para terminar la sección se muestra la tabla 3 correspondiente al tipo de fondo y a las relaciones de aspecto trabajadas.

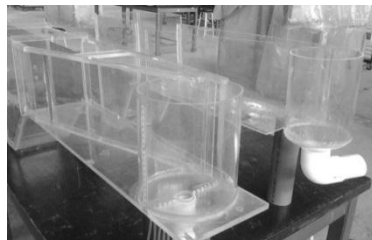


Figura 39 Dispositivos de fondo plano y cónico físicos.



Figura 40 Visualización del fondo plano y cónico en los dispositivos.

Tabla 3 Relaciones de aspecto y tipo de fondo de los hidrogeneradores de vórtice.

Dispositivo	Tipo	e/d
1	PLANO	0.17
2	PLANO	0.20
3	PLANO	0.27
4	CONICO	0.17
5	CONICO	0.13
6	CONICO	0.10

4.3 CURVA DE VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE CORRENTOMETRO PARA VÓRTICE

De acuerdo a la norma ISO-9000, los equipos de medida se encargan de realizar mediciones sobre las variables involucradas en los procesos industriales. A partir de ellos, se observa y se controla el proceso. Dichas mediciones deben ser fiables, seguras y de gran exactitud, y en general permitir la visualización del proceso [22].

Cada aplicación de un equipo de medida requiere de una exactitud y de unas prestaciones distintas. Si se pretendiera exigir mayor confianza a la medida que la necesaria, el costo del proceso de medida se vería incrementado sustancialmente. La elección, por tanto, se debe realizar a partir del conocimiento de las características, tanto estáticas como dinámicas, que definen el funcionamiento de estos equipos [22].

En primer lugar, la calibración se define como la operación de comparar la salida de un equipo de medida frente a la salida de un patrón de exactitud conocida cuando la misma entrada (magnitud medida) es aplicada a ambos instrumentos. Durante el proceso de calibración el equipo es verificado para un conjunto de puntos representativos de todo su rango de medida [23].

El correntómetro de vórtice fue el instrumento utilizado para la medición de la velocidad angular. Puesto que el sistema de medición no tiene referencia alguna de los parámetros a controlar en la medición de vórtices, requiere una curva de

verificación que garantice un correcto funcionamiento del instrumento. El método usado en la calibración fue el mismo principio básico de la anemometría en la medición de la velocidad del viento [24], esta idea se adaptó a la instrumentación disponible para la experimentación.

Teniendo en cuenta los mismos principios que la anemometría, el correntómetro para vórtice debía cumplir los mismos requisitos como son, 1) El correntómetro debe ser físicamente pequeño, 2) Debe ser sensible; es decir, debe tener una fuerza de giro baja y una respuesta rápida a las velocidades del vórtice, 3) Debe tener una respuesta lineal y 4) Debe ser mecánica y electrónicamente simple [25].

Ahora, la calibración consistió en que a cada elemento removible se le midió la velocidad angular que marcaba al estar en el interior del vórtice del vaso precipitado, generado por la acción del agitador electromagnético, y se representó gráficamente en función de la velocidad del vórtice que era determinada por un medidor digital propio del sistema de agitador electromagnético (figura 41). Esta medida se podía controlar en varias magnitudes.

A partir de la velocidad mínima que muestra el tablero digital, que hace girar el elemento removible en el vórtice generado en el vaso precipitado, se tomó una muestra de 30 segundos de la velocidad angular que registra el correntómetro de vórtice. Para una velocidad de giro (magnitud de salida) del agitador electromagnético se tomaron un total de 10 muestras. Luego se aumentó la velocidad del agitador electromagnético progresivamente.

Las curvas de verificación se construyeron para cada uno de los elementos removibles, cada serie corresponde a cada uno de los siete elementos removibles utilizados.

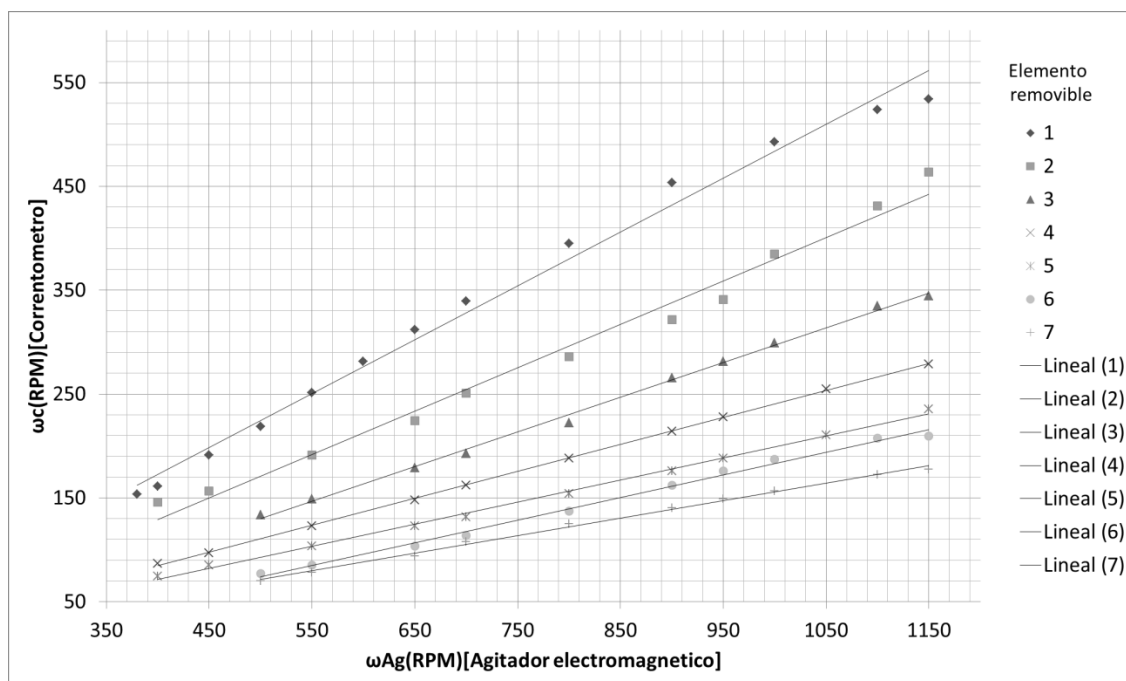


Figura 41 Diagrama de verificación del correntómetro de copas.

Los puntos de ensayo se sometieron a un análisis de regresión lineal para determinar el coeficiente de correlación y la ecuación de calibración para cada caso (tabla 4). Puesto que el coeficiente de correlación determina cómo se relacionan estrechamente dos cantidades, el conjunto de resultados que producen el coeficiente de correlación cercano a la unidad corresponde al conjunto óptimo [24].

Tabla 4 Ecuaciones de calibración y coeficiente de correlación para cada elemento removible.

Elemento Removible	Ecuación de calibración	Coeficiente de correlación
1	$y=0.52x-34.6$	0.99
2	$y=0.42x-37.6$	0.99
3	$y=0.33x-37.3$	0.99
4	$y=0.26x-19.4$	0.99
5	$y=0.21x-13.3$	0.99
6	$y=0.22x-35.0$	0.99
7	$y=0.17x-13.2$	0.99

Los resultados indican un comportamiento lineal con un coeficiente de determinación arriba de 0.90 indicando un ajuste adecuado. Se observa que cada curva tiene un punto de

inicio diferente ya que cada elemento removible requirió una velocidad inicial diferente debido al peso y geometría de cada uno en el montaje.

Visualmente se pudo establecer que la velocidad de giro registrada por el correntómetro no es tan cercana a la que marca el tablero digital del agitador electromagnético, indicando esto que desde el punto de vista de la hidrodinámica del fenómeno, las velocidades de giro del vórtice de estudio estarán determinadas por el dispositivo.

El hecho de que las velocidades angulares registradas sean las del instrumento más no a las del fenómeno formado, obedece a que la técnica usada en la medición es intrusiva. En términos generales para el fin del estudio experimental aquí realizado es una aproximación permisible debido a que el instrumento de medición cumple las características definidas por su aplicación como equipo de medida como son el rango de medida, alcance y sensibilidad de la medida [23].

Además, el correntómetro para vórtice cumple de manera satisfactoria las características que determinan la capacidad de medida del equipo como son: la fidelidad del equipo para registrar el mismo valor de variable al medirla varias veces en las mismas condiciones; la zona muerta, que se presenta cuando el elemento removible está detenido en el interior del vórtice y se aprecia que el correntómetro no registra señal; y por último, la resolución, la cual se aprecia como el rango mínimo de cambio en la entrada que produce un cambio observable en la salida [23].

4.4 ANÁLISIS DIMENSIONAL

En los dispositivos de fondo plano las relaciones de aspecto se obtuvieron variando el parámetro (e), mientras que en los dispositivos generadores de vórtice de fondo cónico este cambio se logró mediante la variación del parámetro (d). Por lo anterior, se hizo necesario dos análisis dimensionales, uno para cada tipo de dispositivo.

Primero, se realizó el análisis dimensional implementando el Teorema de π (pi) de Vaschy-Buckingham a un dispositivo hidrogenerador de vórtice de fondo cónico, para conocer los parámetros adimensionales y empezar a experimentar. Luego, para tomar en cuenta el cambio de la geometría se efectuó un segundo análisis dimensional a un dispositivo hidrogenerador de vórtice de fondo plano, con el mismo fin. Se relacionaron los factores asociados a la geometría, al fluido y las características de interés asociadas a la hidrodinámica del vórtice.

De la relación funcional que se describió en la metodología.

$$\omega = f(e, V_o, d, \Delta h, g, \mu, \rho, r, z)$$

siendo $n = 10$, las dimensiones básicas son M (masa), L (longitud), y T (tiempo), $j = 3$ según las variables estables de manera que $K = 7$

$$\omega = T^{-1}; \quad e = L; \quad V_o = \frac{L}{T}; \quad d = L; \quad \Delta h = L; \quad g = \frac{L}{T^2}; \quad \rho = \frac{M}{L^3}; \quad \mu = \frac{M}{LT}; \quad r = L; \quad z = L$$

Se seleccionaron para el primer análisis orientado a los dispositivos de fondo cónicos como variables estables.

V_o, ρ y d

A continuación se combinan las variables seleccionadas con cada una de las restantes como sigue:

$$\pi_1 = V_o^a \rho^b d^c \omega = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{1}{T}\right) = M^0 L^0 T^0 \quad (13)$$

Masa: $b = 0$

Longitud: $a - 3b + c = 0$

Tiempo: $-a - 1 = 0$

resolviendo el sistema se llega a:

$$a = -1 \quad b = 0 \quad c = 1$$

reemplazando se obtiene

$$\pi_1 = \frac{d\omega}{V_0} = St \quad (14)$$

De la misma manera se hallan los otros parámetros adimensionales cambiando la variable que se relaciona con las variables estables.

$$\pi_2 = V_0^a \rho^b d^c e = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c (L) = M^0 L^0 T^0 \quad (15)$$

Masa: $b = 0$

Longitud: $a - 3b + c + 1 = 0$

Tiempo: $-a = 0$

$$a = 0 \quad b = 0 \quad c = -1$$

Obteniéndose

$$\pi_2 = \frac{e}{d} \quad (16)$$

Para Δh obtenemos

$$\pi_3 = \frac{\Delta h}{d} \quad (17)$$

Para el caso de g (gravedad) y μ (viscosidad), se escoge el exponente -1 para asegurar que quede en el denominador

$$\pi_4 = V_0^a \rho^b d^c g^{-1} = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{L}{T^2}\right)^{-1} = M^0 L^0 T^0 \quad (18)$$

Masa: $b = 0$

Longitud: $a - 3b + c - 1 = 0$

Tiempo: $-a + 2 = 0$

$$a = 2 \quad b = 0 \quad c = -1$$

de lo anterior resulta

$$\pi_4 = \frac{V_o^2}{g d} = Fr^2 \quad (19)$$

$$\pi_5 = V_o^a \rho^b d^c \mu^{-1} = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{LT}\right)^{-1} = M^0 L^0 T^0 \quad (20)$$

Masa: $b - 1 = 0$

Longitud: $a - 3b + c + 1 = 0$

Tiempo: $-a + 1 = 0$

$$a = 1 \quad b = 1 \quad c = 1$$

por tanto,

$$\pi_5 = \frac{V_o \rho d}{\mu} = Re \quad (21)$$

Para los parámetros r y z se obtuvieron respectivamente

$$\pi_6 = \frac{r}{d} \quad (22)$$

$$\pi_7 = \frac{z}{d} \quad (23)$$

Resumiendo, la expresión funcional adimensional buscada es:

$$\frac{d\omega}{V_o} = f\left(\frac{e}{d}, \frac{\Delta h}{d}, \frac{Vo^2}{dg}, \frac{Vod\rho}{\mu}, \frac{r}{d}, \frac{z}{d}\right) \quad (24)$$

En lo referente a los dispositivos de fondo plano se seleccionaron como variables estables las siguientes:

V_o, ρ y e

El procedimiento es muy semejante al primer análisis pero para éste "d" es remplazado por "e".

$$\pi_1 = V_o^a \rho^b e^c \omega = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{1}{T}\right) = M^0 L^0 T^0 \quad (25)$$

Masa: $b = 0$

Longitud: $a - 3b + c = 0$

Tiempo: $-a - 1 = 0$

resolviendo el sistema se llega a:

$$a = -1 \quad b = 0 \quad c = 1$$

sustituyendo se obtiene

$$\pi_1 = \frac{e\omega}{V_o} = St \quad (26)$$

Siguiendo este procedimiento se hallan los parámetros adimensionales de la misma forma cambiando la variable que se relaciona con las variables estables. Para el parámetro "d" lo ubicamos con exponente negativo para que resulte en el denominador en el parámetro adimensional.

$$\pi_2 = V_o^a \rho^b e^c d^{-1} = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c (L)^{-1} = M^0 L^0 T^0 \quad (27)$$

Masa: $b = 0$

Longitud: $a - 3b + c - 1 = 0$

Tiempo: $-a = 0$

$$a = 0 \quad b = 0 \quad c = 1$$

Obteniéndose

$$\pi_2 = \frac{e}{d} \quad (28)$$

Para Δh obtenemos

$$\pi_3 = \frac{\Delta h}{e} \quad (29)$$

Para el caso de g (gravedad) y μ (viscosidad)

$$\pi_4 = V_o^a \rho^b e^c g^{-1} = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{L}{T^2}\right)^{-1} = M^0 L^0 T^0 \quad (30)$$

$$\pi_4 = \frac{V_o^2}{g e} = Fr^2 \quad (31)$$

$$\pi_5 = V_o^a \rho^b e^c \mu^{-1} = \left(\frac{L}{T}\right)^a \left(\frac{M}{L^3}\right)^b (L)^c \left(\frac{M}{LT}\right)^{-1} = M^0 L^0 T^0 \quad (32)$$

$$\pi_5 = \frac{V_o \rho e}{\mu} = Re \quad (33)$$

Finalmente los parámetros r y z se obtuvieron respectivamente

$$\pi_6 = \frac{r}{e} \quad (34)$$

$$\pi_7 = \frac{z}{e} \quad (35)$$

En consecuencia la expresión funcional adimensional resultante es:

$$\frac{e\omega}{V_o} = f\left(\frac{e}{d}, \frac{\Delta h}{e}, \frac{Vo^2}{eg}, \frac{Voep}{\mu}, \frac{r}{e}, \frac{z}{e}\right) \quad (36)$$

4.6 EVALUACIÓN DE LOS PARAMETROS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL USANDO LA INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

Partiendo de las posibles aplicaciones que podría tener el dispositivo generador de vórtice en la generación de energía eléctrica, se trabajó la evaluación de los parámetros adimensionales con los valores promedios de los datos adquiridos, con el fin de generar información útil para el diseño, a partir de lo mencionado se asume el vórtice reproducido como un cuerpo en rotación a manera de cuerpo

rígido. Luego de asumir lo anterior, la evaluación de los parámetros obtenidos se presenta en una primera fase en las tablas 5 y 6.

Tabla 5 Parámetros adimensionales promedio en los dispositivos de fondo plano.

e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	Fr	Re
0.17	0.45	1	0.34	1.55	1715
	0.48	2	0.35	1.60	1769
	0.04	3	0.37	1.65	1825
	0.25	4	0.38	1.73	1912
e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	Fr	Re
0.20	0.06	1	0.31	1.29	1866
	0.11	2	0.32	1.32	1920
	0.35	3	0.34	1.38	2004
	0.01	4	0.34	1.41	2049
e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	Fr	Re
0.27	0.10	1	0.29	1.02	2276
	0.30	2	0.29	1.04	2315
	0.68	3	0.29	1.05	2344
	0.05	4	0.29	1.05	2350

Si fuera valido aplicar la clasificación del régimen de flujo usando el número de Froude y el número de Reynolds como se aplica al flujo en un canal, sería factible el análisis siguiente.

De manera general, en los parámetros promedios presentados se aprecia que la velocidad media, el número de Froude y el número de Reynolds, aumentan cuando disminuye el caudal. Para una relación de aspecto, los valores promedios de Reynolds y de Froude inferidos, determinan cómo es el régimen del flujo incidente al cambiar el caudal de trabajo.

Para el primer dispositivo de relación $e/d = 0.17$, el número de Reynolds indica que el flujo incidente es laminar, aunque no se mantiene estacionario ya que con un caudal menor el número de Reynolds aumenta; sin embargo, continúa con un comportamiento como si estuviera formado por láminas delgadas ($Re \leq 2100$). Por su parte, los valores del número de Froude en los cuatro caudales ensayados fueron los correspondientes al régimen supercrítico ($Fr > 1$). Esto quiere decir que en el flujo incidente la fuerza inercial es más significativa que la fuerza gravitatoria.

Por otra parte, con la segunda relación de aspecto $e/d = 0.20$, los valores del número de Froude fueron menores en comparación con el primer dispositivo; sin embargo, el flujo incidente se mantuvo en el régimen supercrítico, mientras que los valores del número de Reynolds crecieron, pero se mantuvieron como flujo laminar.

Por último, en el dispositivo con relación de aspecto $e/d = 0.27$ (plano 3), se observaron números de Froude menores a los de los dispositivos 1 y 2, manifestándose un régimen de flujo incidente aproximadamente crítico, es decir, que se presenta una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, y por otra parte, los valores del número de Reynolds en este dispositivo indican un flujo incidente de transición ($2100 \leq Re \leq 3000$).

Es posible que el régimen de flujo supercrítico que se presenta en dos de los tres dispositivos de fondo plano, se deba justamente a este tipo de fondo, el cual provoca que en la partícula fluida la fuerza inercial sea más significativa que la fuerza gravitatoria.

Repitiendo el proceso de evaluación anterior, pero ahora para los dispositivos de fondo cónico, se evaluaron los parámetros del número de Reynolds y del número de Froude teniendo en cuenta el parámetro "e" en lugar del parámetro "d" a pesar de ser este el que aparece como resultado del análisis dimensional. Esto se debió a que la evaluación de estos parámetros es para apreciar el régimen de flujo en la zona de incidencia al cilindro, es decir, al final del canal semiconvergente, de manera que si se tuviera en cuenta el parámetro "d", estaríamos involucrando secciones diferentes del dispositivo.

La evaluación de los parámetros obtenidos del análisis dimensional usando la información experimental para los dispositivos hidrogeneradores de fondo cónico se aprecia en la tabla 6 siguiente.

Tabla 6 Parámetros adimensionales promedio en los dispositivos de fondo cónico.

e/d	$\Delta h/d$	Caudal	Vo (m/s)	Fr	Re
0.17	0.02	1	0.38	1.71	1883
	0.13	2	0.39	1.77	1958
	0.01	3	0.43	1.92	2122
	0.14	4	0.46	2.67	2291
e/d	$\Delta h/d$	Caudal	Vo (m/s)	Fr	Re
0.13	0.08	1	0.56	2.54	2808
	0.00	2	0.56	2.54	2798
	0.07	3	0.58	2.64	2912
	0.34	4	0.59	2.08	2946
e/d	$\Delta h/d$	Caudal	Vo (m/s)	Fr	Re
0.10	0.32	1	0.75	3.39	3736
	0.28	2	0.72	3.25	3584
	0.30	3	0.69	3.10	3416
	0.37	4	0.76	3.43	3790

De manera general, en comparación con los dispositivos de fondo plano, los dispositivos de fondo cónico desarrollaron velocidades más elevadas, estas se vieron reflejadas especialmente en el parámetro del número de Froude, donde en los tres dispositivos evaluados, bajo los cuatro caudales cada uno, presentaron magnitudes que clasifican el flujo incidente como supercrítico con magnitudes mucho mayores a las del fondo plano, mostrando como el efecto de la fuerza de inercia es más incidente en la partícula fluida que la fuerza gravitatoria por efecto de que el fondo ejerce una depresión sobre el flujo incidente a la cámara aumentando su velocidad en una magnitud considerable.

Ahora, de manera más particular, en el dispositivo con $e/d = 0.17$ (dispositivo 4), el régimen de flujo fue laminar, excepto en los dos caudales más bajos (caudal 3 y 4), donde el régimen de flujo incidente fue de transición. Por otra parte, en el dispositivo con relación de aspecto $e/d = 0.13$ (dispositivo 5) el flujo incidente se mantuvo en el régimen de transición y el dispositivo con $e/d = 0.10$ (dispositivo 6), el régimen del flujo incidente al que hace alusión el parámetro del número de Reynolds es turbulento, es decir, se produce un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional de las partículas fluidas.

Otro punto del proceso evaluativo se centró en la medida de la intensidad del vórtice, con miras a su aplicación en

aspectos prácticos. Es importante resaltar que este proceso se hizo suponiendo al remolino como un cuerpo rígido que gira con una velocidad angular media que resultó al promediar primero las velocidades angulares en los respectivos niveles de cada radio, y después el valor promedio de las velocidades angulares promedio de todos los radios.

Con este procedimiento se encontraron los resultados expuestos en las tablas 7 y 8.

Tabla 7 Medida de la intensidad para efectos prácticos en los dispositivos de fondo plano.

e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.17	0.45	1	0.34	287	1.39	0.41
	0.48	2	0.35	263	1.28	0.37
	0.04	3	0.37	242	1.18	0.34
	0.25	4	0.38	187	0.91	0.26
e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.20	0.06	1	0.31	285	1.39	0.40
	0.11	2	0.32	259	1.26	0.37
	0.35	3	0.34	234	1.14	0.33
	0.01	4	0.34	198	0.96	0.28
e/d	$\Delta h/e$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.27	0.10	1	0.29	270	1.31	0.38
	0.30	2	0.29	250	1.22	0.35
	0.68	3	0.29	224	1.09	0.32
	0.05	4	0.29	177	0.86	0.25

Tabla 8 Medida de la intensidad para efectos prácticos en los dispositivos de fondo cónico.

e/d	$\Delta h/d$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.17	0.02	1	0.38	311	1.51	0.44
	0.13	2	0.39	286	1.39	0.41
	0.01	3	0.43	252	1.22	0.36
	0.14	4	0.46	196	0.95	0.28
e/d	$\Delta h/d$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.13	0.08	1	0.56	271	1.32	0.39
	0.00	2	0.56	246	1.20	0.35
	0.07	3	0.58	211	1.03	0.30
	0.34	4	0.59	159	0.78	0.23
e/d	$\Delta h/d$	Caudal	V_o (m/s)	ω_{prom} (rpm)	V_ϕ (m/s)	Γ (m ² /s)
0.10	0.32	1	0.75	234	1.14	0.33
	0.28	2	0.72	225	1.10	0.32
	0.30	3	0.69	191	0.93	0.27
	0.37	4	0.76	138	0.67	0.20

Bajo los supuestos hechos, de las tablas precedentes se puede apreciar que los vórtices en los dispositivos hidrogeneradores ensayados tendrían una intensidad que depende fundamentalmente del caudal; en todos los

dispositivos, la circulación aumenta con el aumento del caudal, esto quiere decir que en un desarrollo posterior el canal del dispositivo debe ser estudiado para que éste logre la mejor captación posible de agua del flujo principal o, si hablamos de canales pequeños, que se adapte la configuración geométrica del dispositivo al tamaño del canal para que capte todo su caudal.

Otro parámetro importante en la intensidad es el fondo cónico del dispositivo hidrogenerador, ya que ayuda en gran medida al aumento de la velocidad en la apertura de alimentación por una mejor descarga de caudal en el orificio de salida; este elemento genera velocidades angulares y tangenciales mayores en comparación con el fondo plano.

Dentro de las relaciones de aspecto evaluadas, la mayor intensidad se produce cuando el diámetro de descarga "d" es seis veces más grande que el parámetro del ancho de la apertura de alimentación. Si el parámetro del ancho de la apertura de alimentación al cilindro es más grande que esta razón, se tiene un vórtice con una menor velocidad de incidencia que genera menores velocidades angulares y tangenciales, es decir, de menor intensidad. Sin embargo, al aumentar mucho más el caudal que genera el vórtice, es plausible que se mantenga o se eleve la velocidad en la apertura de alimentación. Por otra parte, cuando el diámetro del orificio de descarga fue mayor a seis veces el ancho de la apertura de alimentación, la interfase entre el agua y el aire tuvo mayor diámetro y el caudal de descarga fue superior al de alimentación al cilindro. Este efecto causa una menor intensidad que se aprecia en una disminución de la velocidad de giro, esta situación se podría compensar con un incremento del caudal de alimentación.

4.5 SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS QUE GOBIERNAN EL COMPORTAMIENTO DEL VÓRTICE

Después de los experimentos realizados en los dispositivos hidrogeneradores de vórtice se pudo observar, haciendo uso de

la ecuación (4), que cada nivel presentaba una velocidad tangencial diferente; lo mismo ocurría con la velocidad en la apertura de alimentación al cilindro, dichas velocidades aumentaban conforme disminuía el nivel, siendo máximas en la zona más cercana a la tapa de descarga o al asiento común. Por otra parte, las velocidades angulares aumentaban conforme se acercaba al núcleo de aire, siendo máximas en el menor radio de medición a la mayor profundidad. Lo anterior ocurrió tanto para los dispositivos de fondo cónico como de fondo plano.

Enseguida, se analiza el comportamiento de la velocidad angular adimensionalizada en función del radio adimensionalizado con el ancho del orificio de alimentación, las series en las figuras 42-45 a continuación representan el nivel sobre el que se realizó la medición.

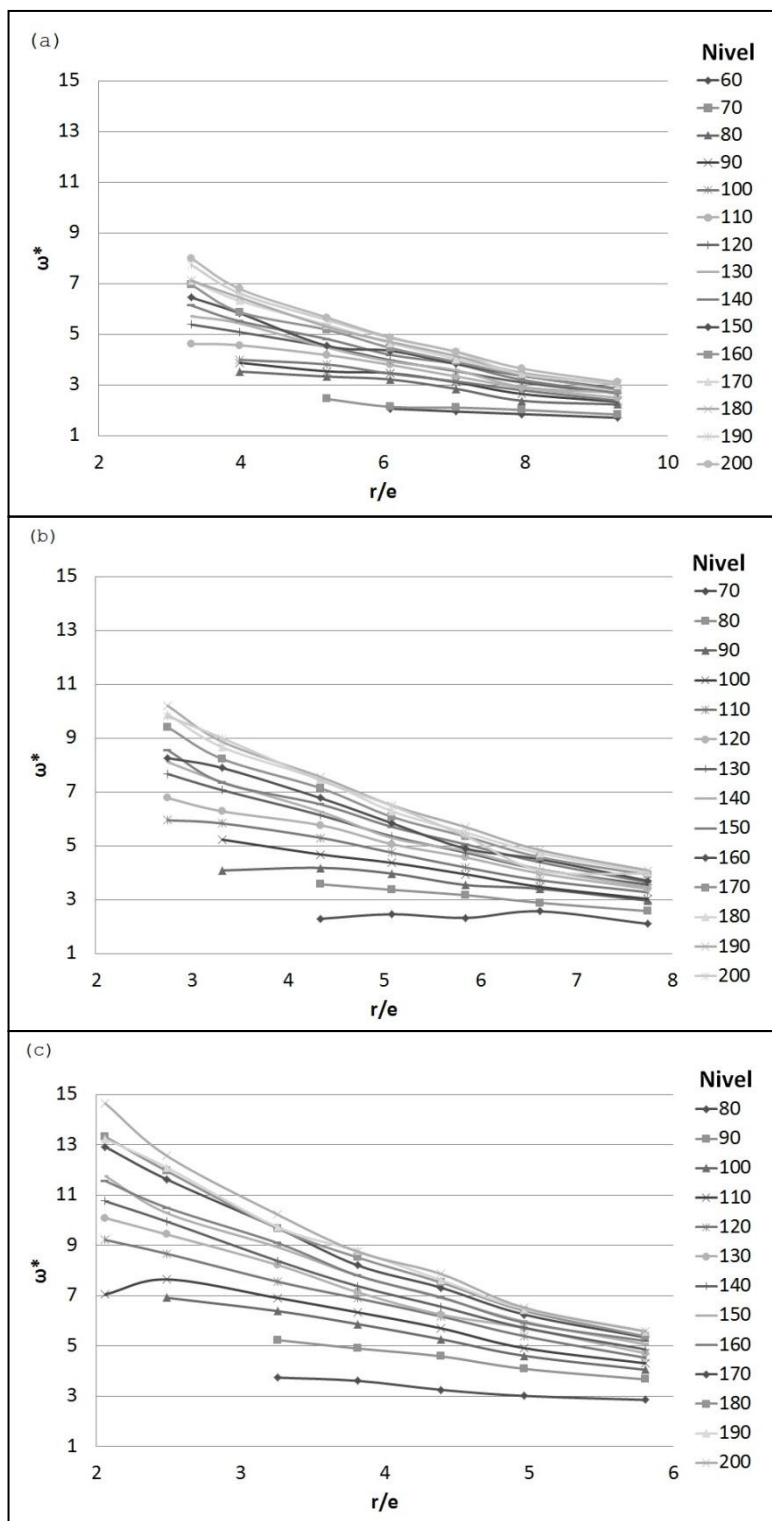


Figura 42 Velocidad angular en función del radio para el caudal 1 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

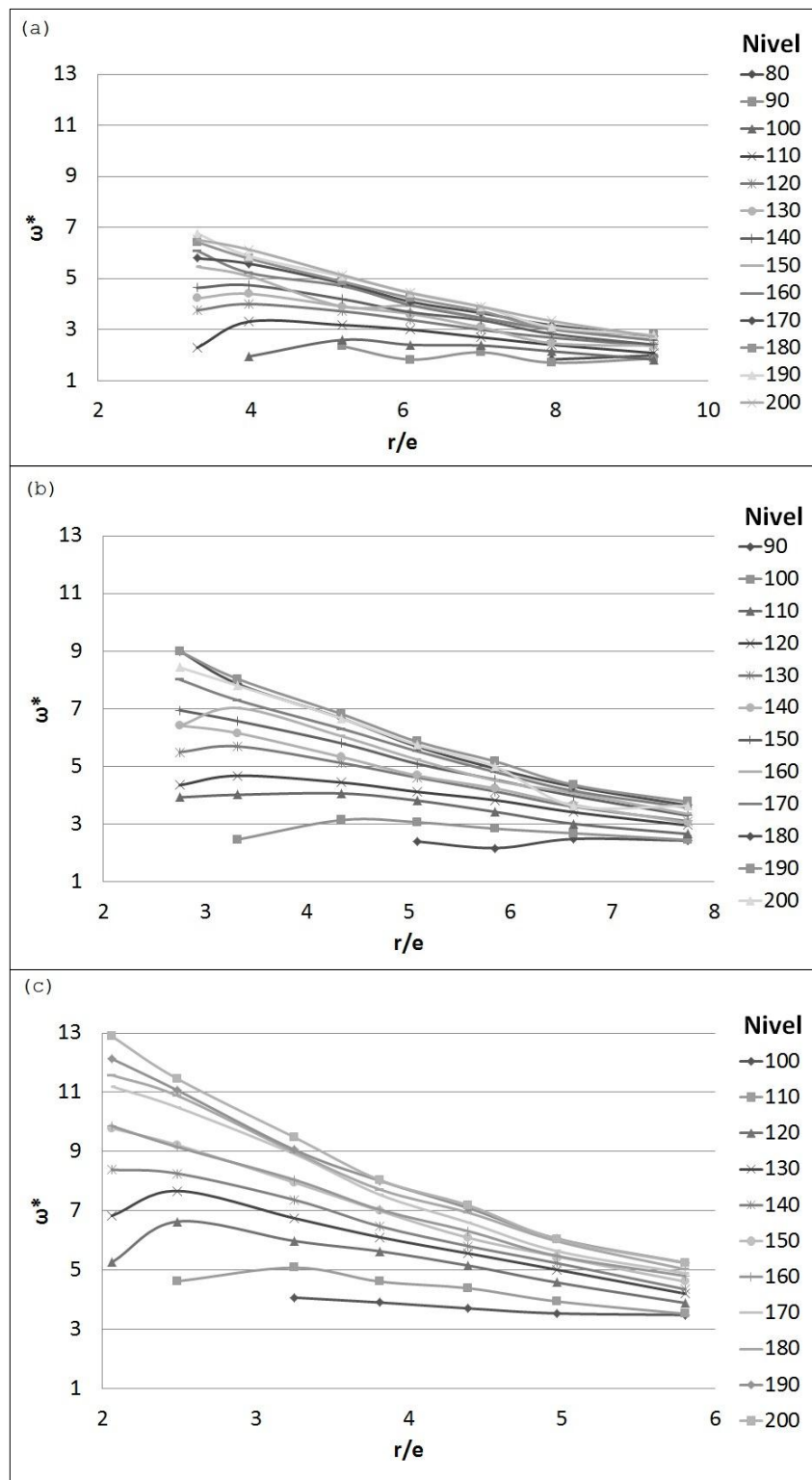


Figura 43 Velocidad angular en función del radio para el caudal 2 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

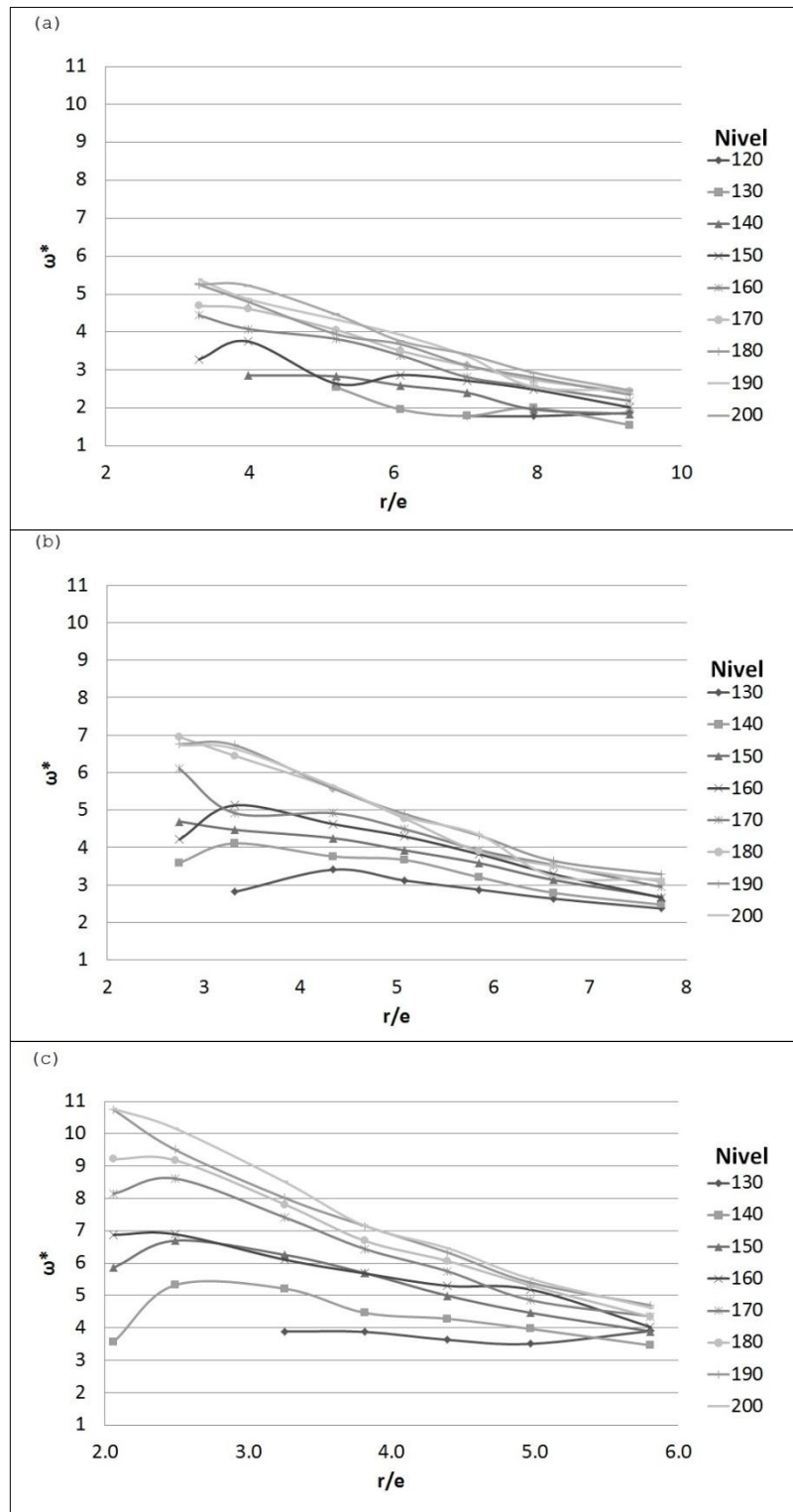


Figura 44 Velocidad angular en función del radio para el caudal 3 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

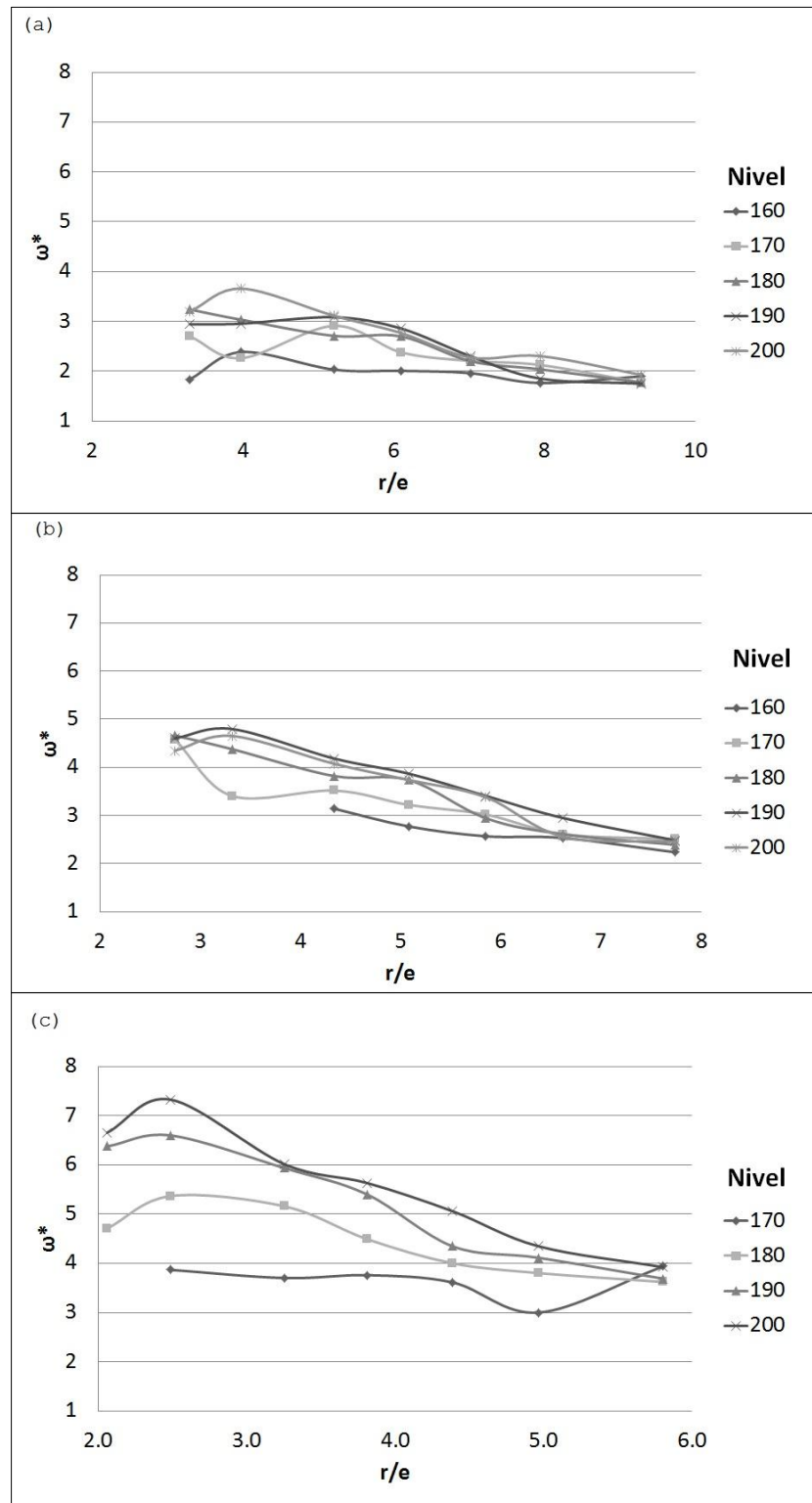


Figura 45 Velocidad angular en función del radio para el caudal 4 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, para un nivel determinado, la velocidad angular disminuye conforme crece el radio, pero aumenta con la profundidad.

Ahora, se observa el comportamiento registrado por la velocidad tangencial en función del nivel de medición (figuras 46-49), considerando cada elemento removible. Para efectos de análisis, se tomó en cuenta el parámetro adimensional de la velocidad tangencial como la razón $\frac{V_{\phi}}{V_o}$, las series representan cada elemento removible del correntómetro de copas.

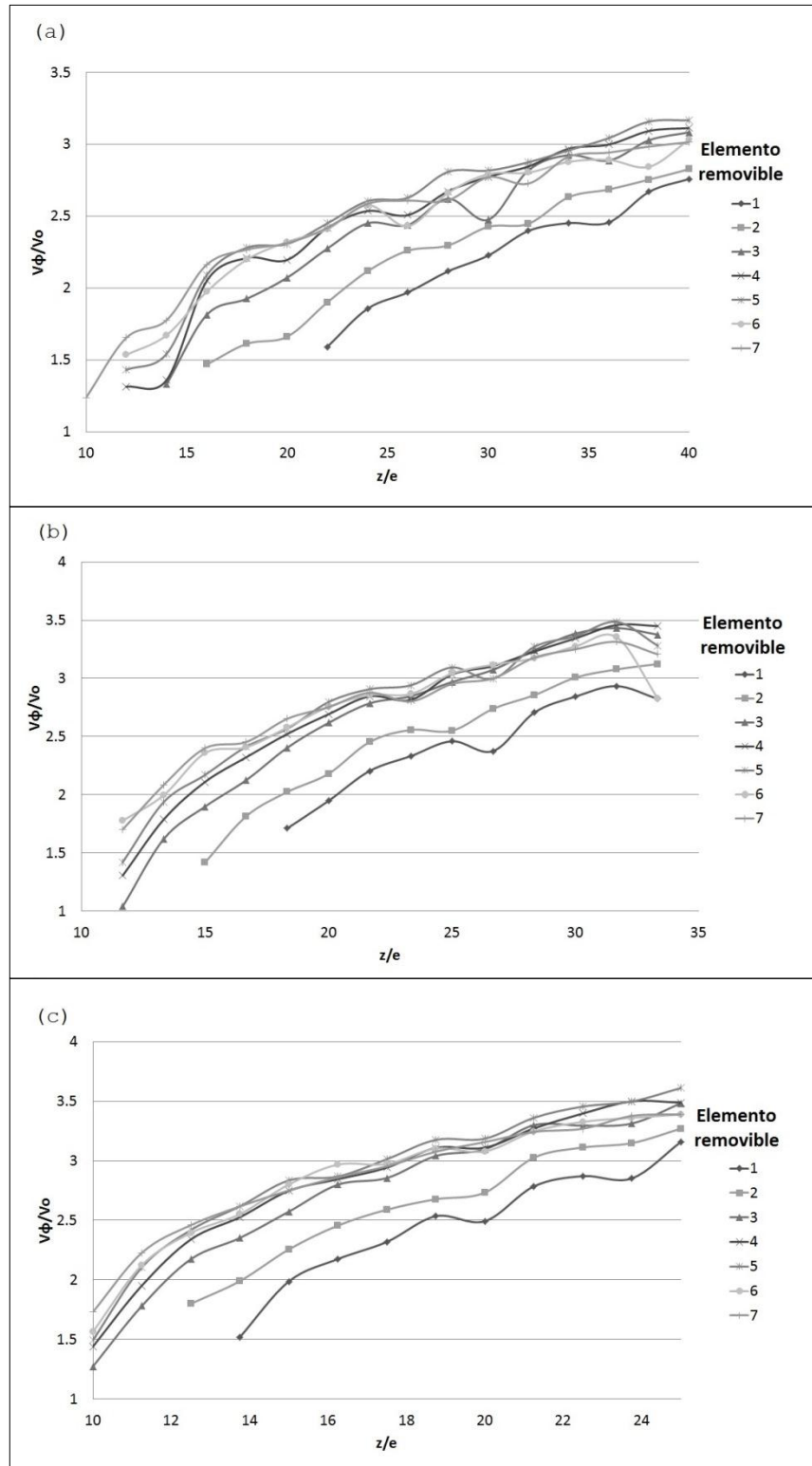


Figura 46 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 1 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

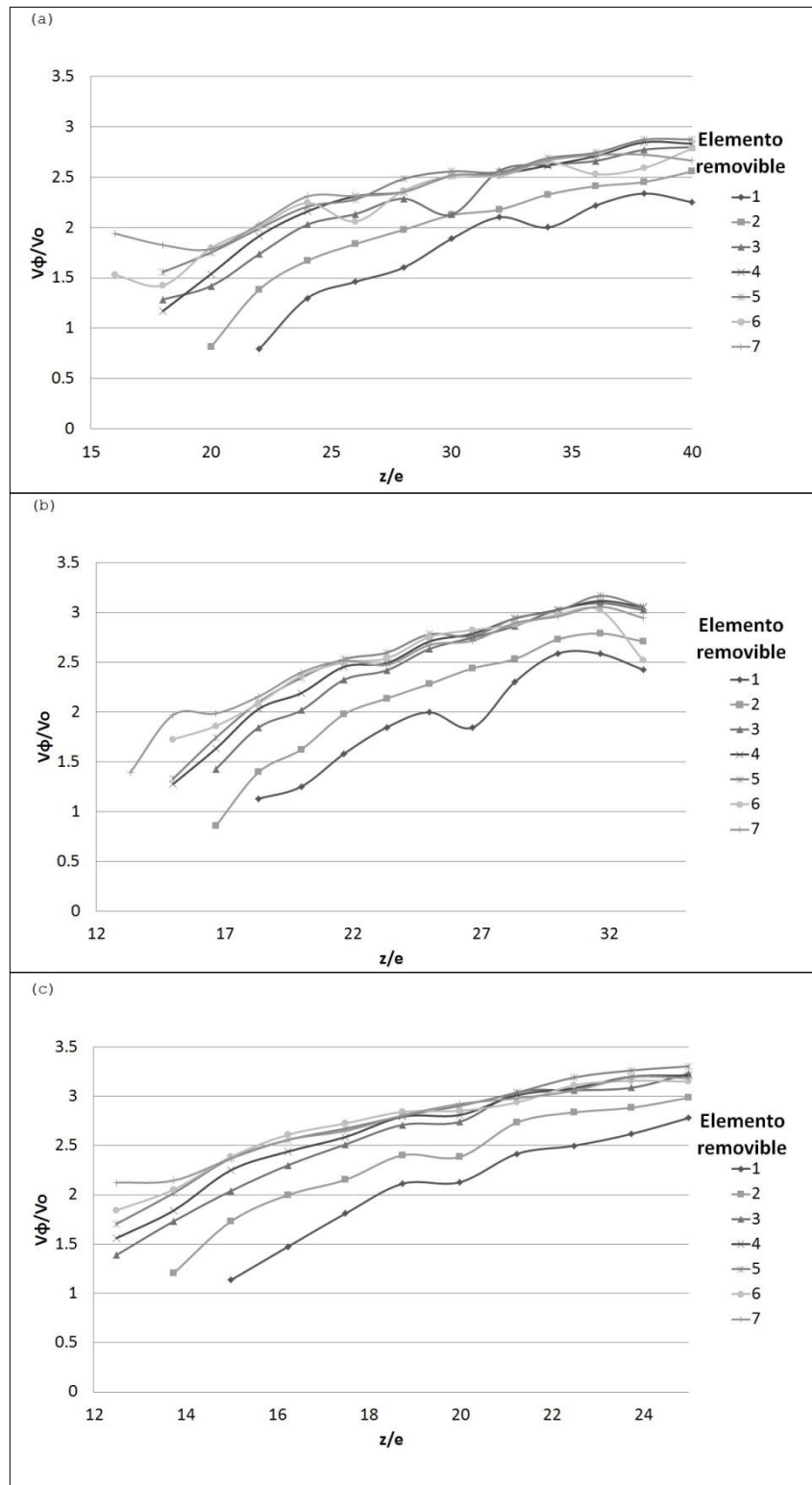


Figura 47 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 2 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

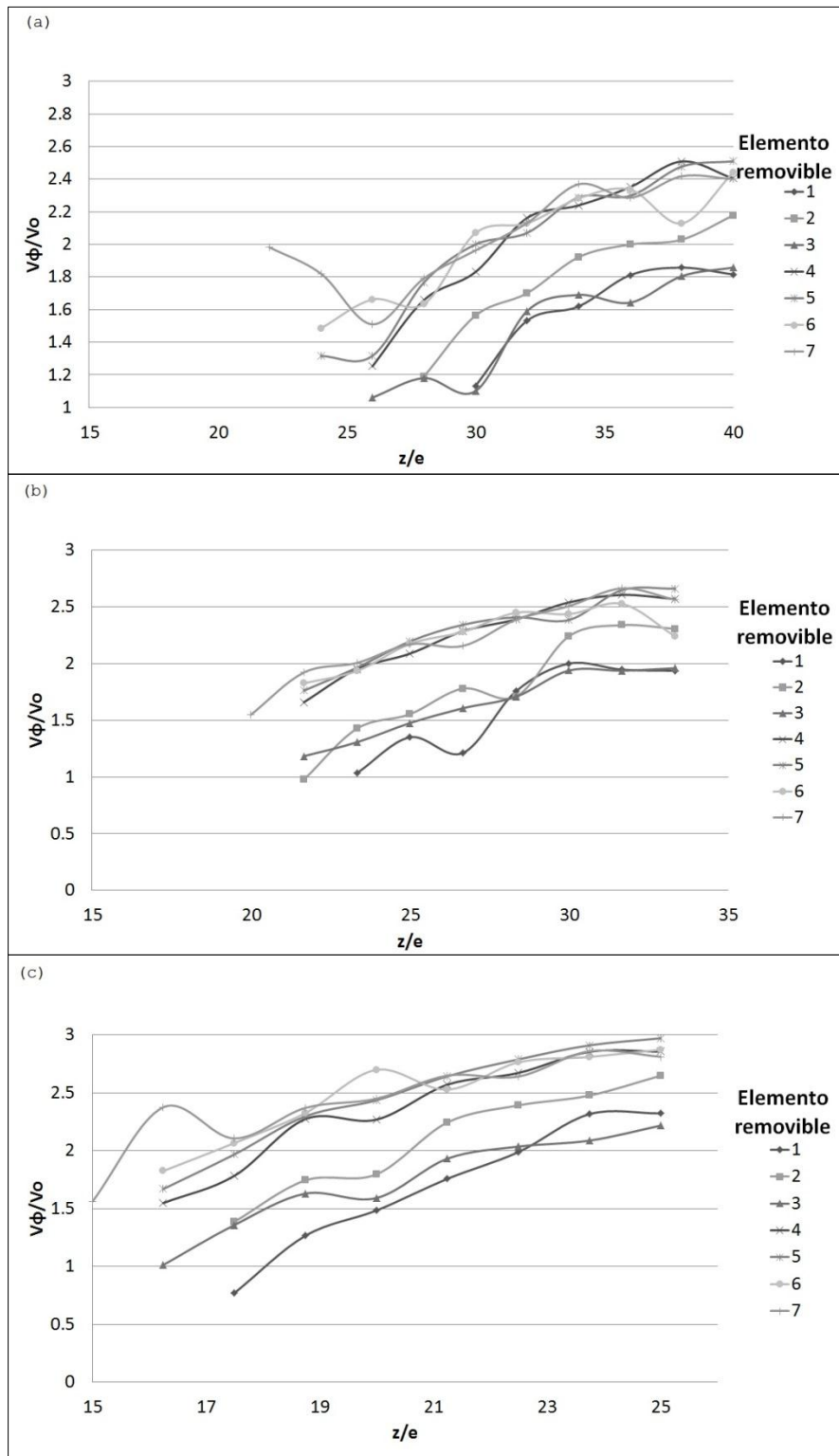


Figura 48 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 3 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

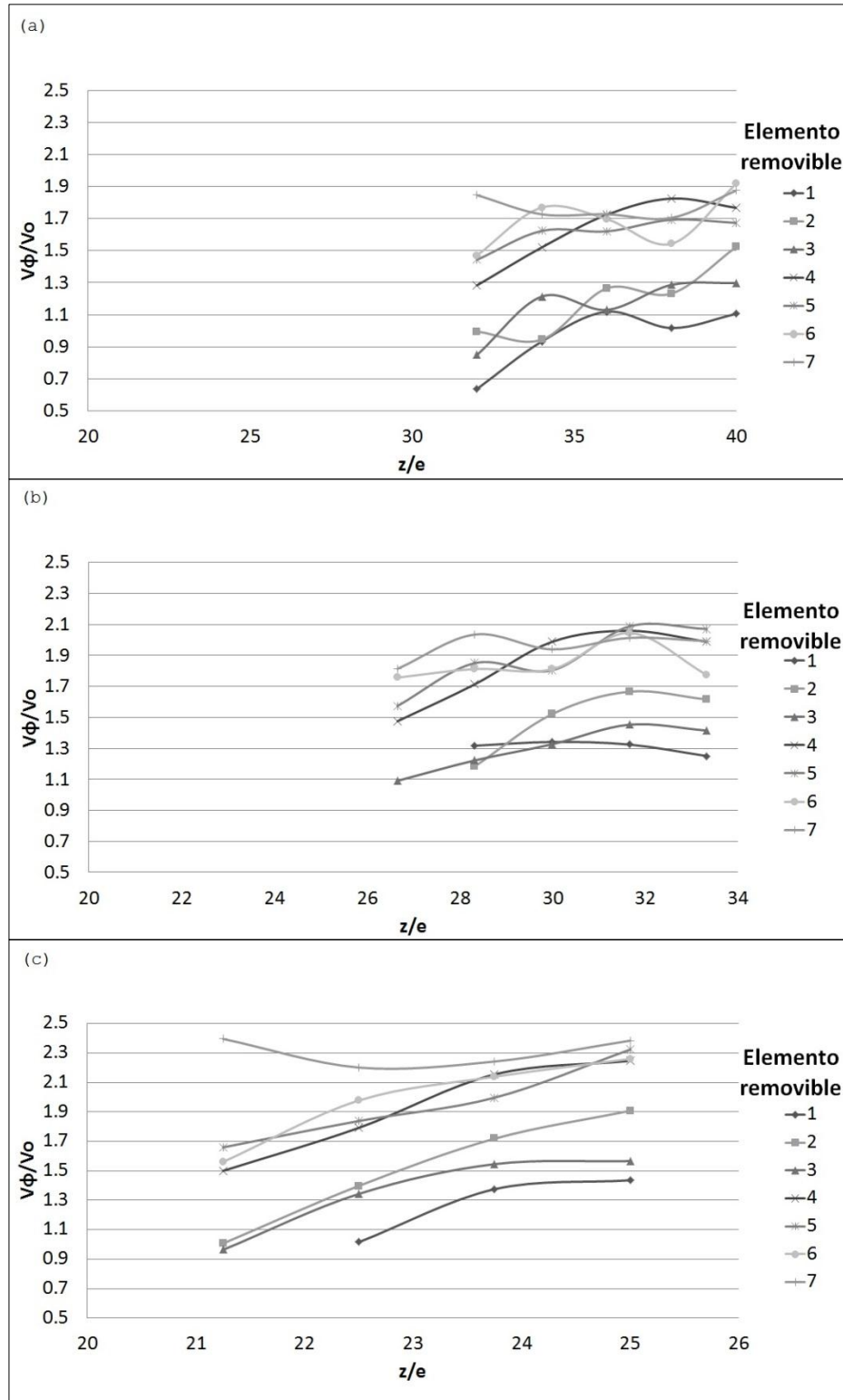


Figura 49 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 4 en (a) dispositivo 1 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 2 ($e/d=0.20$) y (c) dispositivo 3 ($e/d=0.27$).

De las figuras 46-49, es factible inferir el nivel donde las velocidades son máximas (extremo derecho de las curvas graficadas). Éste representa el nivel de medición a la mayor profundidad posible donde se ubicaron los elementos removibles. La velocidad tangencial es mayor en los elementos removibles de mayor radio, a medida que aumenta el nivel de medición, es decir la profundidad, respecto a la superficie libre.

La velocidad tangencial mayor en cada nivel se mantuvo en los elementos removibles de mayor radio, este comportamiento es opuesto al de la velocidad angular, donde los radios menores registraban las velocidades angulares mayores. En consecuencia, es plausible inferir que el parámetro más relevante para una mayor velocidad angular es el radio del brazo del elemento removible.

Cabe resaltar que los comportamientos antes descritos, se mantuvieron dentro de los mismos parámetros en los tres dispositivos ensayados con los cuatro caudales trabajados.

Ahora bien, analizando las variables de interés, velocidad angular (figuras 50-53) y velocidad tangencial (figuras 54-57), para dispositivos hidrogeneradores de vórtice con fondo cónico, se encuentra de manera general un comportamiento similar a los ya mencionados, sin embargo al cambiar de fondo e incrementar el parámetro "d" se encuentran otras tendencias del vórtice. Así, al aumentar "d", se formó un núcleo de aire más grande e inestable, perdiéndose puntos de medición con los elementos removibles de menor radio. Por esta razón, se dificultó la medición de la velocidad angular por la oscilación de la interface entre el aire y el núcleo del remolino de agua. Esto dio lugar a que la velocidad angular para radios menores fue menor que su valor en el radio siguiente, probablemente porque el tramo circular recto del vórtice se reduce en su altura.

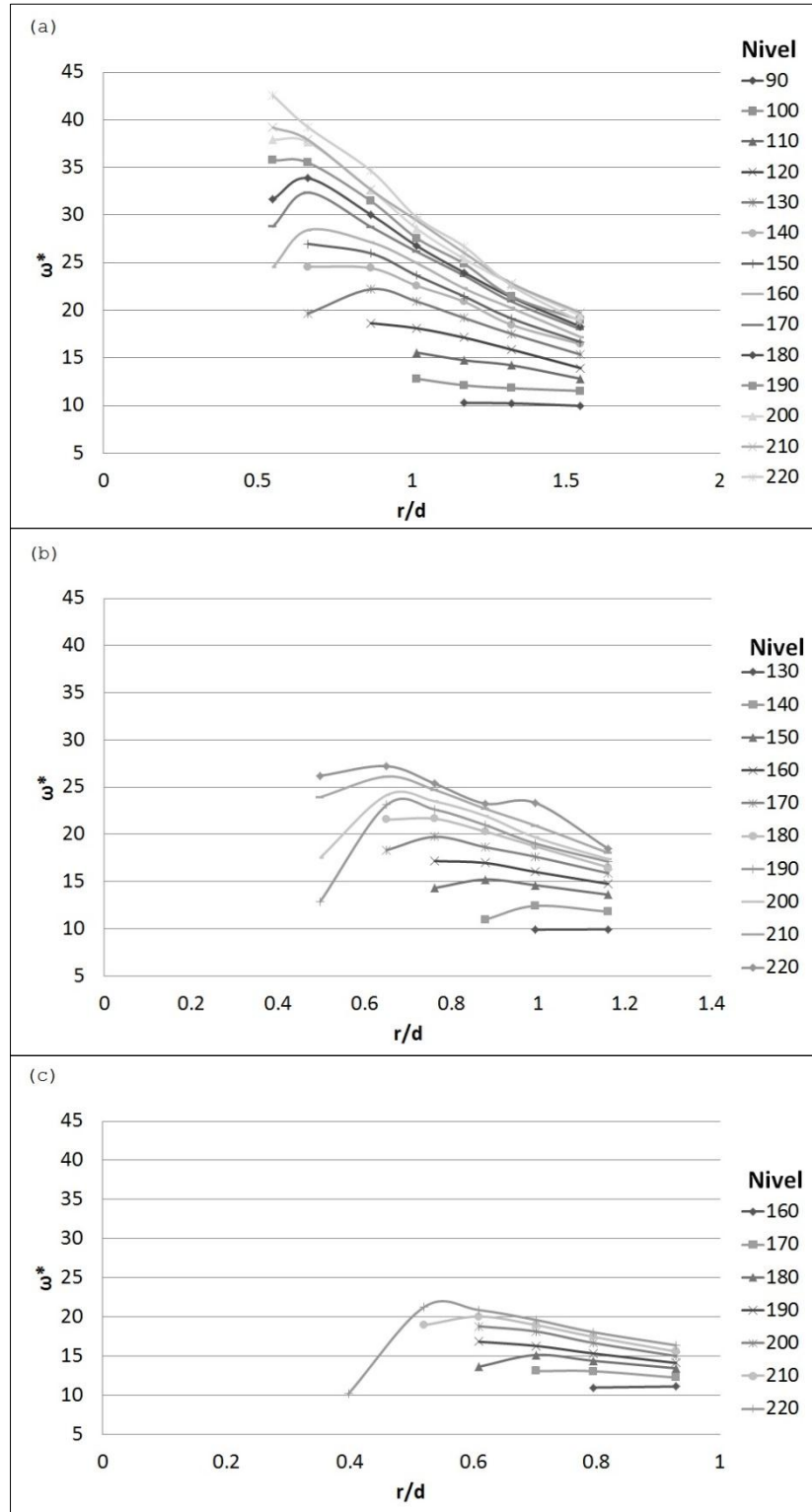


Figura 50 Velocidad angular en función del radio para el caudal 1 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

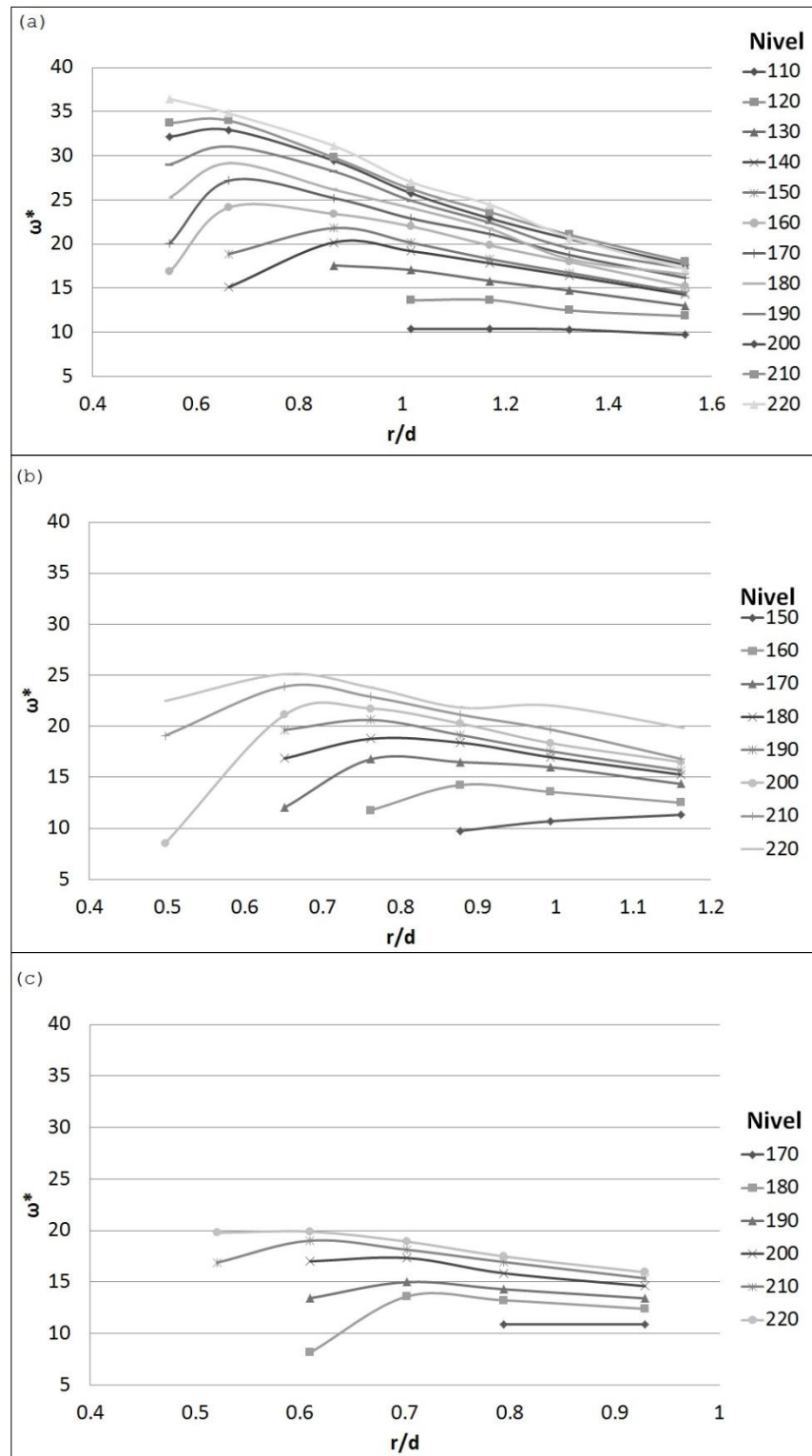


Figura 51 Velocidad angular en función del radio para el caudal 2 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

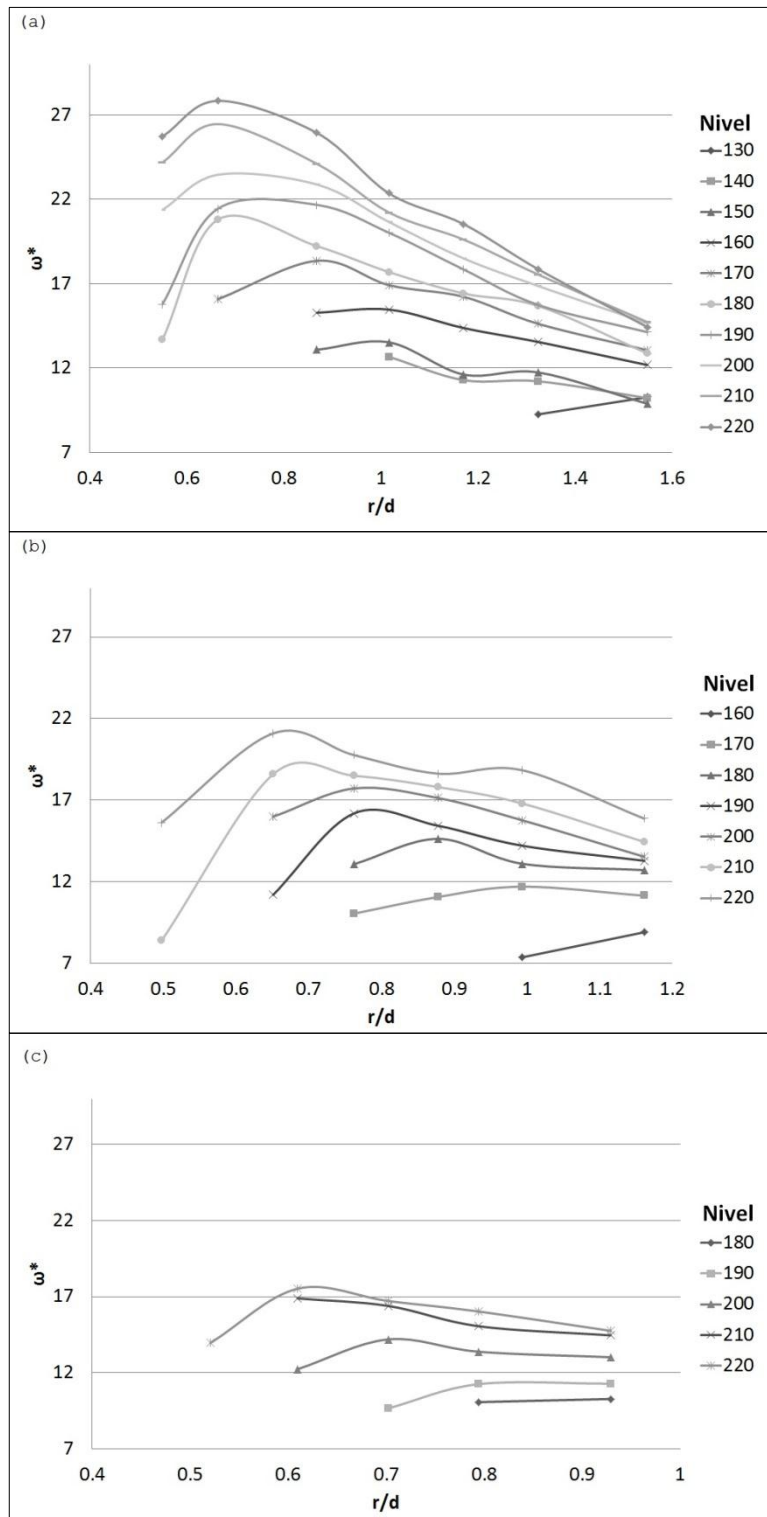


Figura 52 Velocidad angular en función del radio para el caudal 3 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

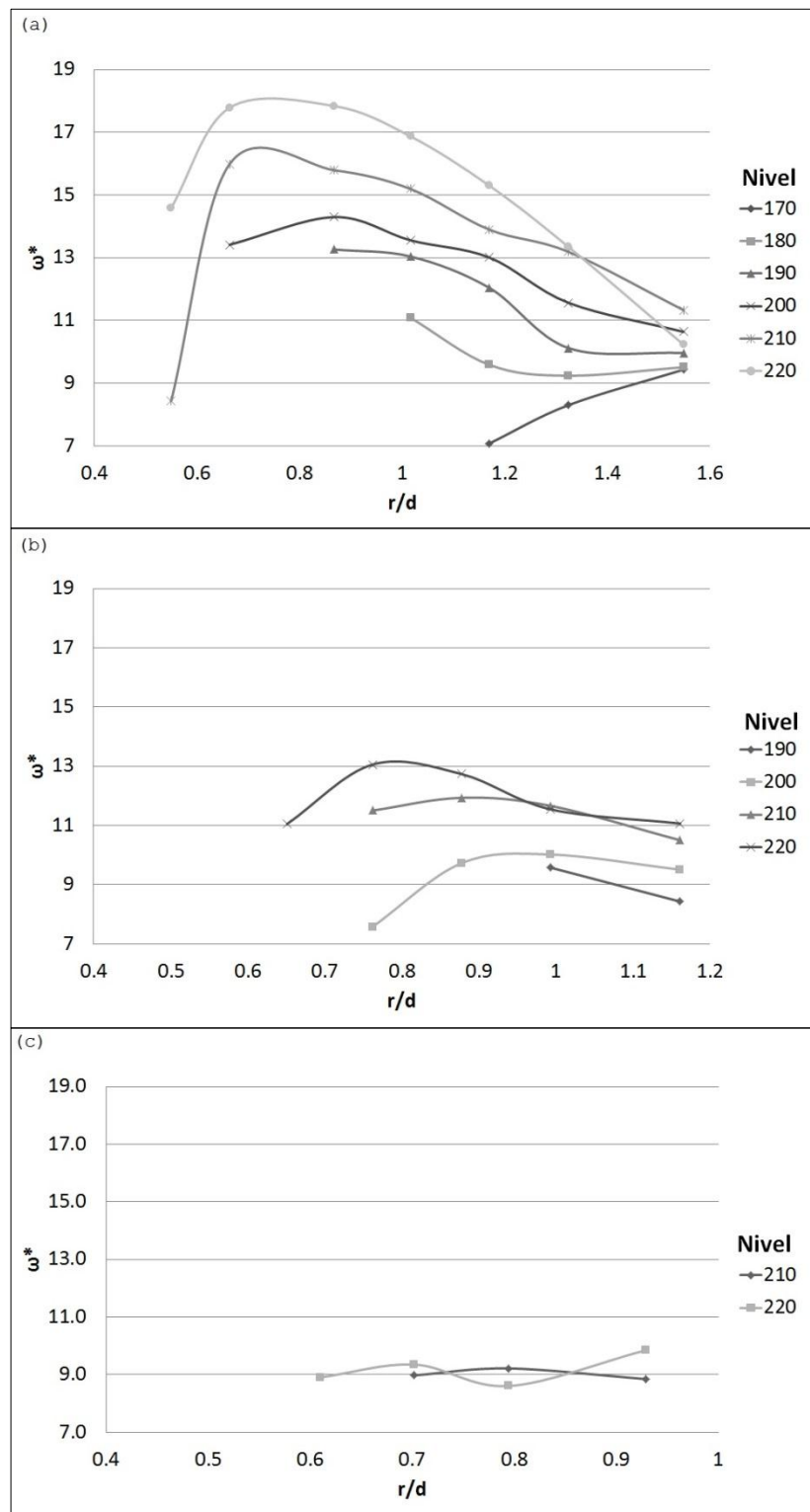


Figura 53 Velocidad angular en función del radio para el caudal 4 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

Un núcleo de aire de mayor diámetro inferior, juega un papel importante ya que ocasiona una descarga más rápida del caudal, provocando que haya menos flujo en rotación para un mismo diámetro de cilindro, en comparación con una cámara con un diámetro de descarga menor. No obstante, el efecto del aumento del orificio de descarga, acerca el núcleo de aire a la apertura de alimentación, generando una depresión que provoca mayores velocidades tangenciales y mayores velocidades de alimentación al cilindro.

A continuación, se presenta para fondo cónico el comportamiento de la velocidad tangencial en función del nivel de medición para cada elemento removible en las figuras 54 a 57.

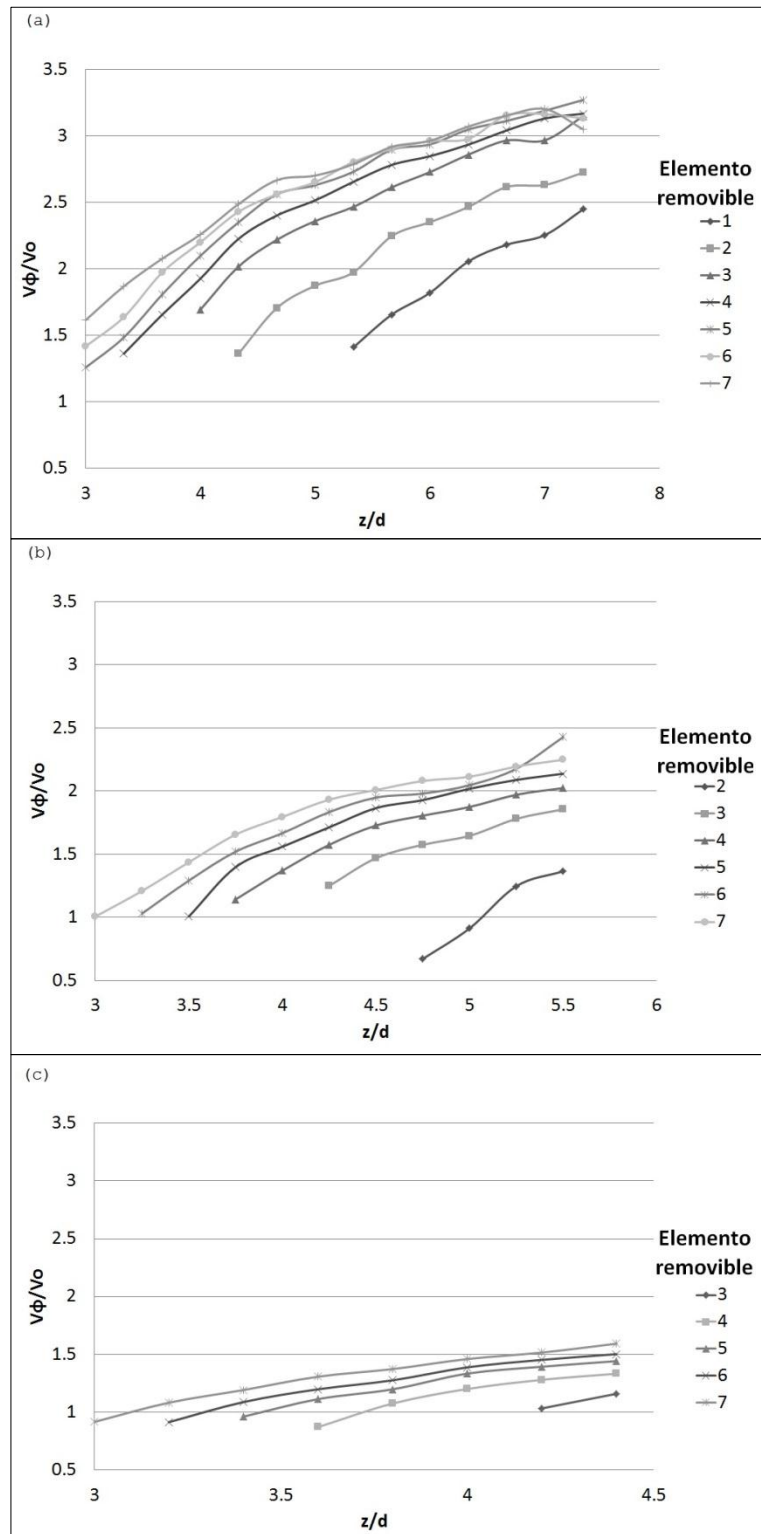


Figura 54 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 1 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

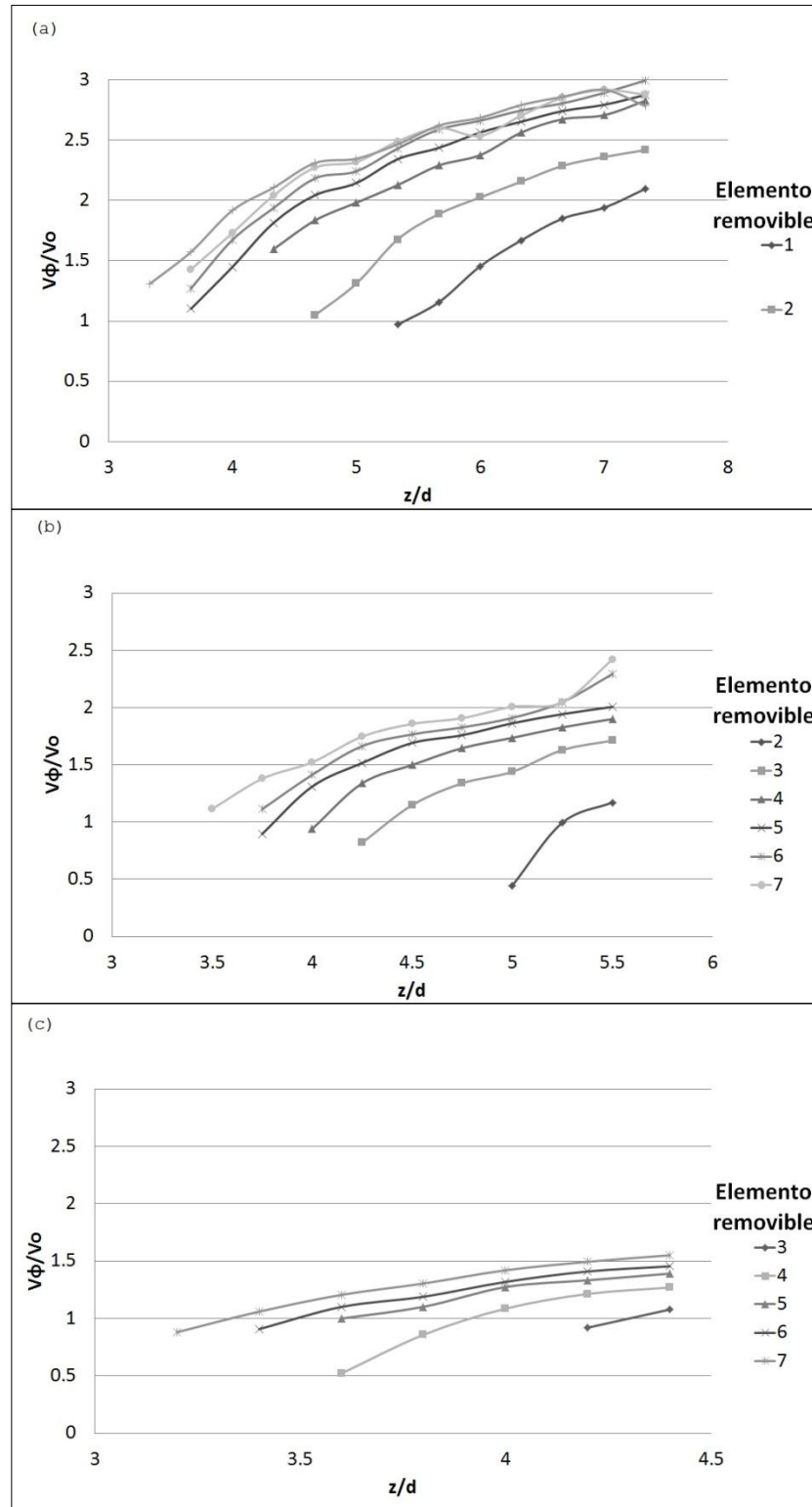


Figura 55 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 2 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

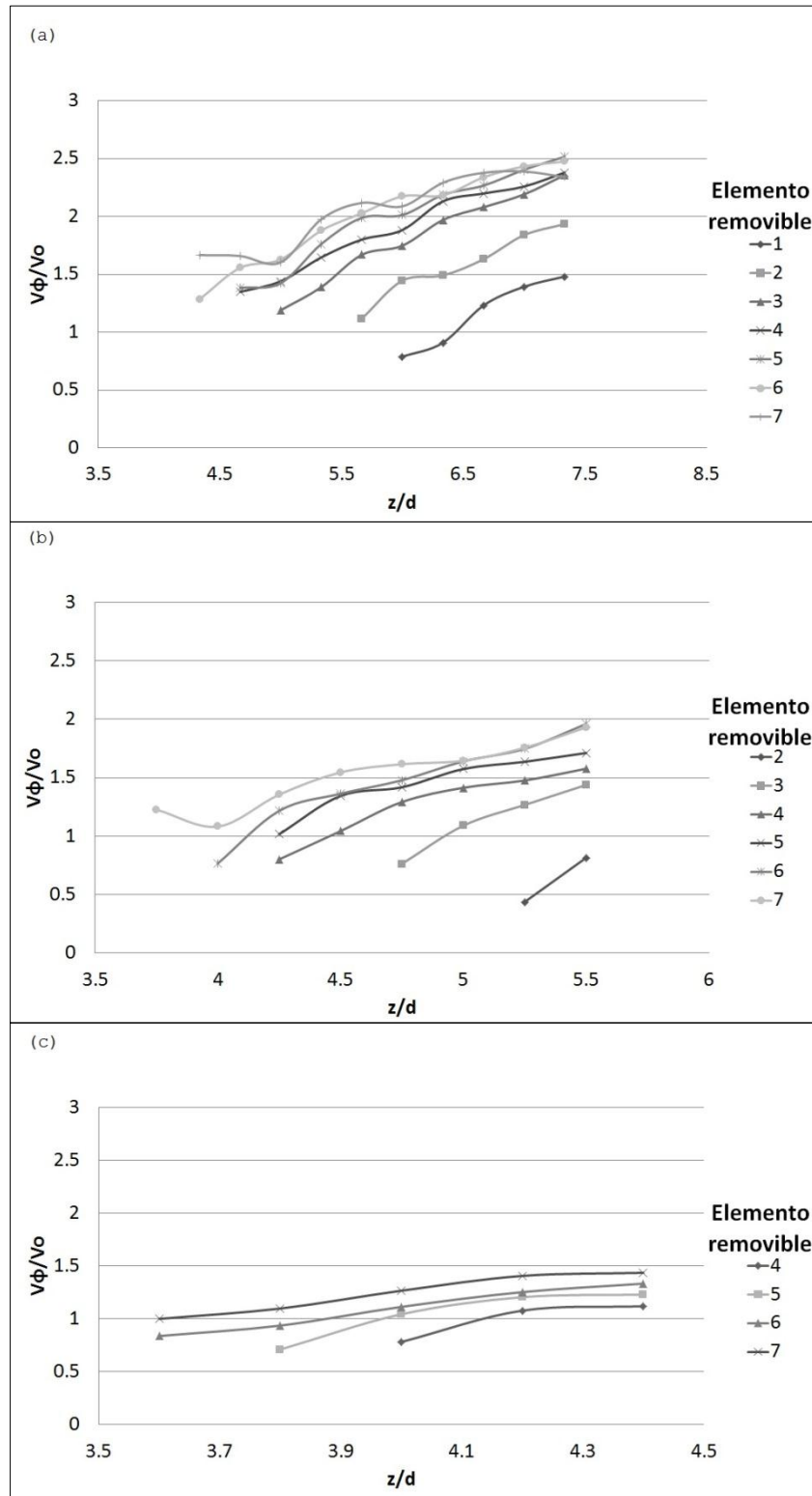


Figura 56 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 3 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

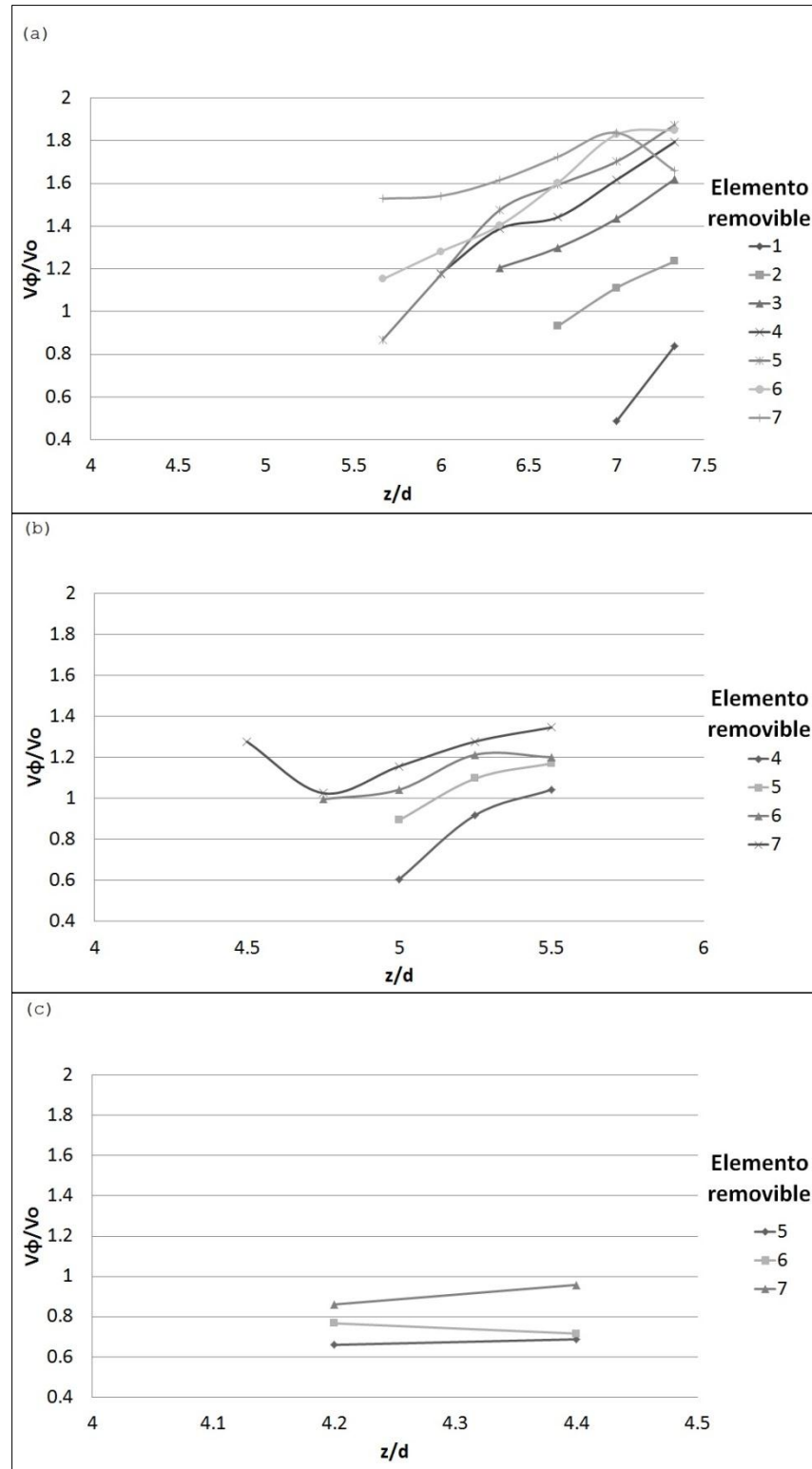


Figura 57 Velocidad tangencial en función del nivel de medición para el caudal 4 en (a) dispositivo 4 ($e/d=0.17$), (b) dispositivo 5 ($e/d=0.13$) y (c) dispositivo 6 ($e/d=0.10$).

La tendencia observada en los dispositivos de fondo plano, se mantiene en los de fondo cónico, alcanzando las máximas velocidades tangenciales en los radios mayores de medición, las cuales van decreciendo a medida que el nivel de profundidad disminuye.

A partir de las observaciones generales hechas, se puede inferir que el vórtice estudiado exhibe las mayores velocidades angulares en la zona inmediata al núcleo de aire en cada nivel, alcanzándose la máxima velocidad angular cerca al orificio de descarga. De igual manera, las velocidades en la apertura de alimentación y las velocidades tangenciales son mayores conforme aumenta la profundidad. Además, la velocidad tangencial de la partícula fluida que parte de la frontera sólida va en aumento de su magnitud, con pequeñas diferencias, a medida que se acerca al eje del vórtice, pero después de cierto radio de medición, la velocidad tangencial se ve reducida en grandes magnitudes al estar en los radios menores, esto por un aumento de la velocidad axial ocasionada por la cercanía al núcleo de aire que genera depresión y ángulo de caída por efecto del orificio de descarga.

Una característica adicional observada en los dispositivos hidrogenadores de vórtice, es que con fondo cónico se alcanzó una mayor velocidad angular, para igual relación de aspecto, y mayor altura del vórtice, debido a que: (i) en el dispositivo con fondo cónico las velocidades son mayores en la apertura de alimentación, porque el fondo cónico facilita la descarga y genera una mayor depresión y (ii) la altura se debe a que la cámara con fondo cónico, en comparación con la cámara de fondo plano, para un mismo nivel de referencia, tiene un volumen menor por efecto de su geometría. Esto reduce la masa de agua dentro de los mismos niveles en comparación, compensado por una mayor altura del vórtice.

Siguiendo con el análisis del comportamiento del vórtice, en los dispositivos generadores de vórtice de fondo plano, una mayor magnitud del parámetro "e", con diámetro de descarga "d" constante, produce menores velocidades en los niveles de la apertura de alimentación. Esto puede obedecer a que a

caudal y diámetro constantes, el aumento de "e" reduce la velocidad del flujo incidente porque crece el área de la apertura de alimentación cuando se mantiene constante el caudal. Por otra parte, en los dispositivos de fondo cónico, a medida que el parámetro "d" aumenta, cuando "e" es constante, se producen mayores velocidades en la alimentación al cilindro producto de la reducción del nivel del agua en la cámara, por la mayor depresión que principalmente se observa en el núcleo de aire del vórtice, lo que mejora la descarga de agua del cilindro.

Por tanto, las características hasta aquí inferidas de los datos experimentales, conducen a creer que el vórtice desarrollado en los dispositivos no es de tipo Rankine, ya que no se presenta como un cuerpo rígido en rotación, en la zona que se supone correspondería al vórtice forzado. Más bien, parece ser que está formado por dos vórtices: (a) uno interno, intenso en los contornos del núcleo de aire y (b) otro externo al anterior donde las partículas fluidas describen un vórtice con trayectorias en espiral concéntricas, hasta que ingresan al vórtice interior, esto por la acción del flujo incidente en cada nivel. Si los supuestos anteriores son correctos, se podría decir que el vórtice interior se caracteriza porque en él predominan el movimiento tangencial y axial sobre el radial, en cambio, en el vórtice exterior, solo hay movimiento tangencial y radial.

También, el vórtice de interés se puede dividir en tres regiones según la pendiente aproximada de la interfase entre el agua y el aire. Esta característica del vórtice en estudio se presentó en todos los dispositivos ensayados. A modo de ilustración, en la figura 58 se presenta para un dispositivo de fondo plano ($e/d = 0.17$).

En la figura 58 a continuación, se observa un núcleo de aire cuya interfase con el agua se construyó a partir de los últimos puntos sobre los que se midió la velocidad angular.

Además, con el fin de ilustrar cómo se desarrolla la interfase del vórtice de interés, enseguida se pretende

explicar su evolución por etapas, a través de la construcción de una línea de corriente, usando una herramienta de geometría dinámica llamada GeoGebra [26]; la explicación se basa en la experimentación y en la observación del vórtice en estudio.

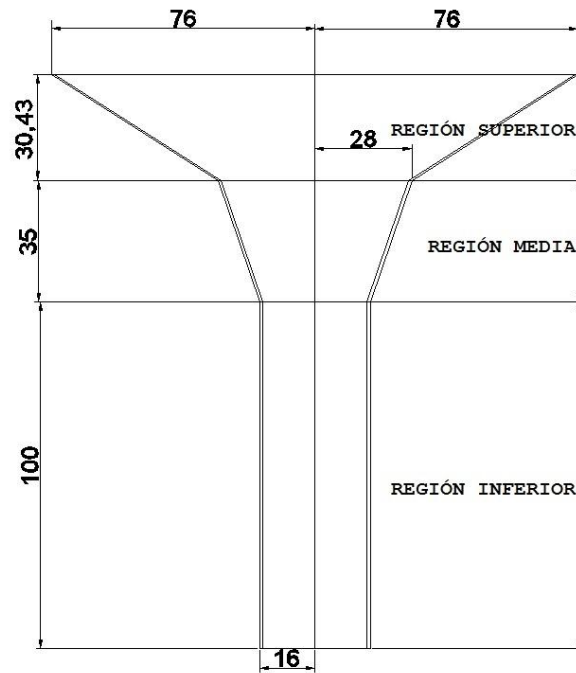


Figura 58 Regiones asociadas al vórtice de estudio.

Cabe agregar que las inclinaciones de la interfase entre el vórtice y el núcleo de aire, pueden obedecer a que la velocidad en el flujo incidente crece con la profundidad, por lo que en la región superior el fluido entra con menor momento angular inicial, el cual aumenta con la profundidad. Esto más la acción de la gravedad por el orificio de fondo serian razones que explican este comportamiento.

En primera instancia, si el vórtice exterior se supone como un vórtice en espiral libre, entonces se puede considerar como producto de la superposición de un vórtice libre y flujo radial incidente por el efecto del orificio de descarga [14]. Este vórtice se desarrolla desde la frontera sólida del cilindro hacia su eje central y se caracteriza porque las trayectorias de las partículas fluidas describen planos

aproximadamente horizontales; esta hipótesis se basa en que en cada nivel la velocidad del agua en la apertura de alimentación crece con la profundidad, lo que podría explicar porque no hay componente axial de la velocidad en el vórtice exterior determinando que las partículas fluidas describan trayectorias más bien planas. En estas condiciones parece ser que las partículas del vórtice exterior, al seguir trayectorias en espiral hacia el centro, a partir de cierto radio entran al vórtice interior quedando sujetas a la acción de la gravedad, por la presencia del orificio en el fondo.

Como un ejemplo que ilustra las ideas antes mencionadas, a continuación, en un nivel medio de la región superior, con el software GeoGebra© se trata de representar la trayectoria de una partícula fluida como muestra la figura 59.

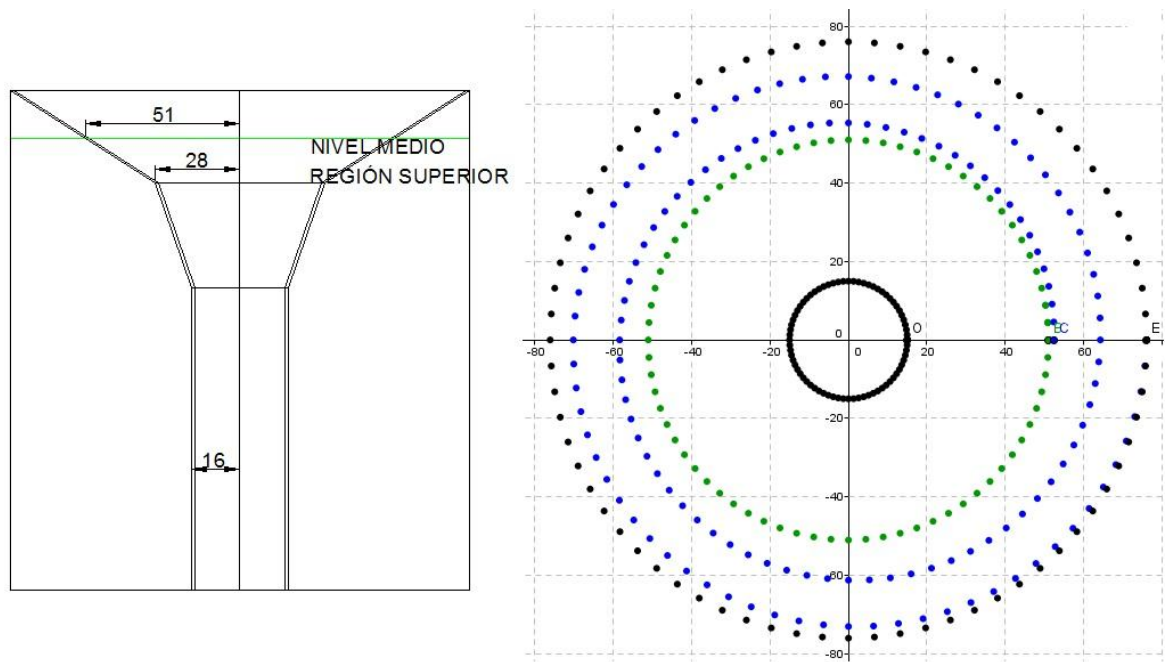


Figura 59 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región superior.

La partícula fluida, parte de la frontera del cilindro (círculo negro de mayor radio en la imagen), describiendo una trayectoria espiral plana (espiral azul) hasta encontrar la interfase con el vórtice interior en ese nivel (círculo verde), volviéndose parte del vórtice interior.

Con el mismo fin, en la figura 60 se representa la trayectoria de una partícula fluida que parte desde la frontera del cilindro en un nivel medio de la región media. La partícula fluida comienza su trayectoria en espiral plana hasta la interfase, con el radio aproximado del vórtice interno en ese nivel.

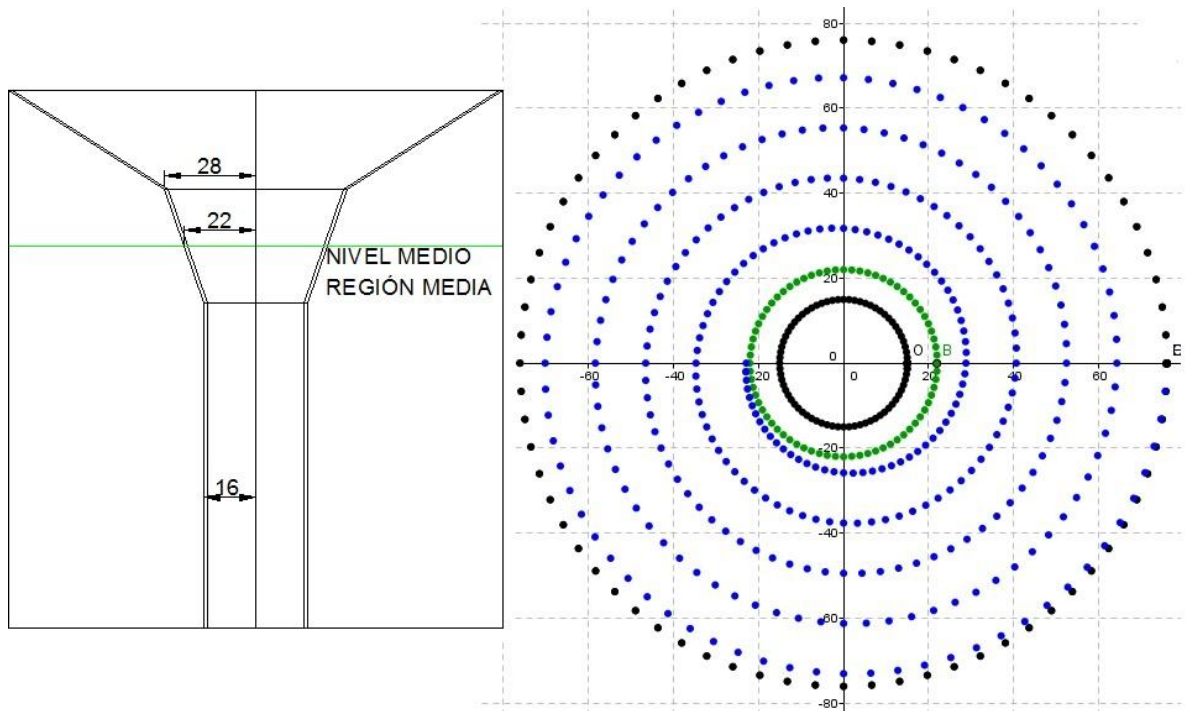


Figura 60 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región media.

Para terminar de ilustrar la trayectoria de las partículas en el vórtice exterior de manera didáctica, enseguida se presenta el curso de una partícula fluida en un nivel medio de la región inferior (figura 61). De la misma manera, se aproxima la partícula fluida describiendo una espiral plana hasta la frontera con el vórtice interior en esa región.

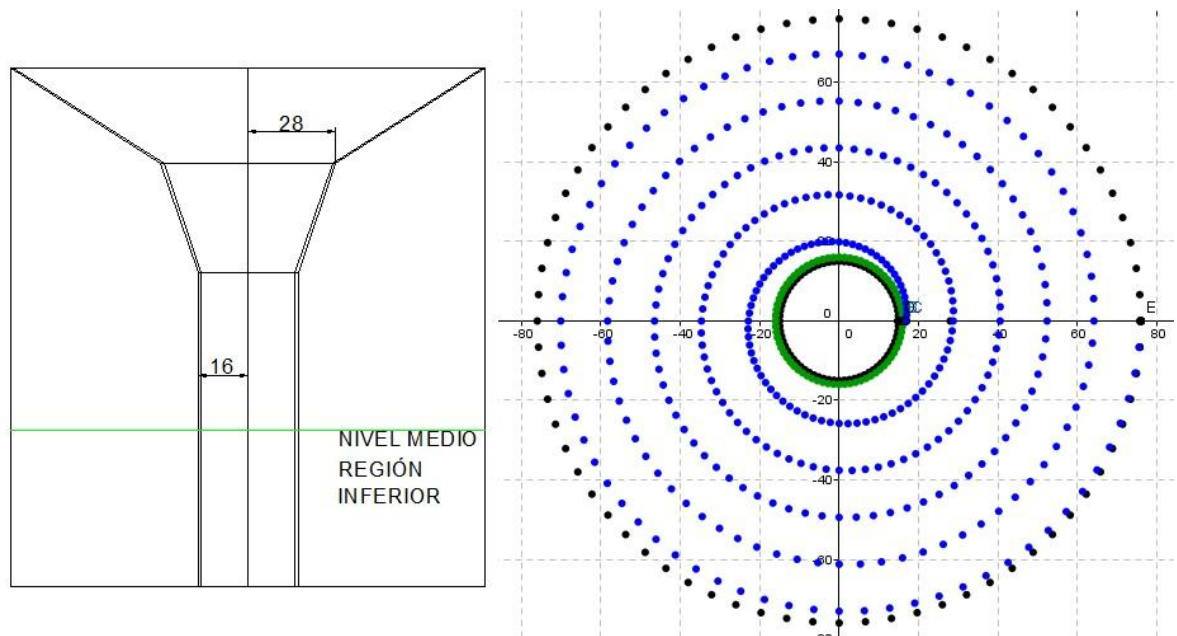


Figura 61 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice exterior en el nivel medio de la región inferior.

Procediendo en la forma antes descrita pero ahora con el vórtice interior, una partícula fluida describe una trayectoria de manera distinta para las tres zonas del vórtice las cuales se pueden describir como sigue: 1) Región superior, el camino de una partícula es semejante al que describe una espiral logarítmica, 2) Región media, el recorrido de una partícula es parecida a la que resulta aplicando una espiral de Arquímedes, y 3) Región inferior, la posición de una partícula se asemeja a la que describe una espiral de radio uniforme.

Una evidencia de esto son las visualizaciones del vórtice (figuras 62 y 63), donde desde una vista lateral y superior se aprecian líneas de flujo más notorias sobre el resto del fluido en rotación.

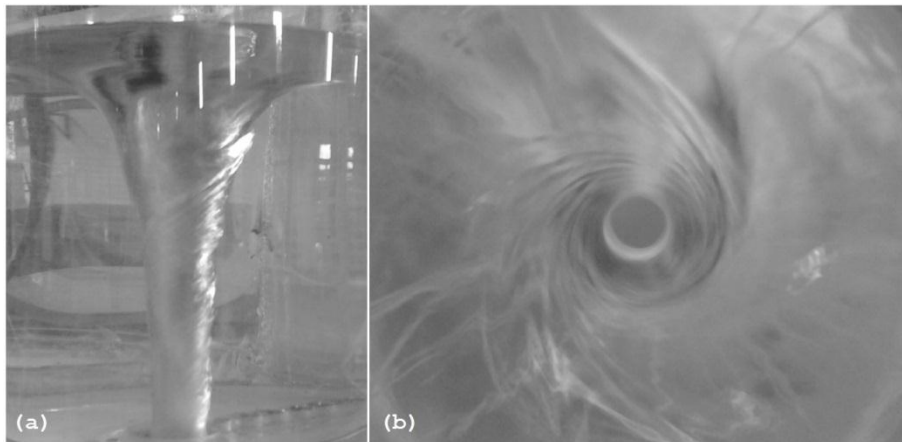


Figura 62 En un dispositivo de fondo plano (a) vista lateral y (b) vista superior del vórtice.

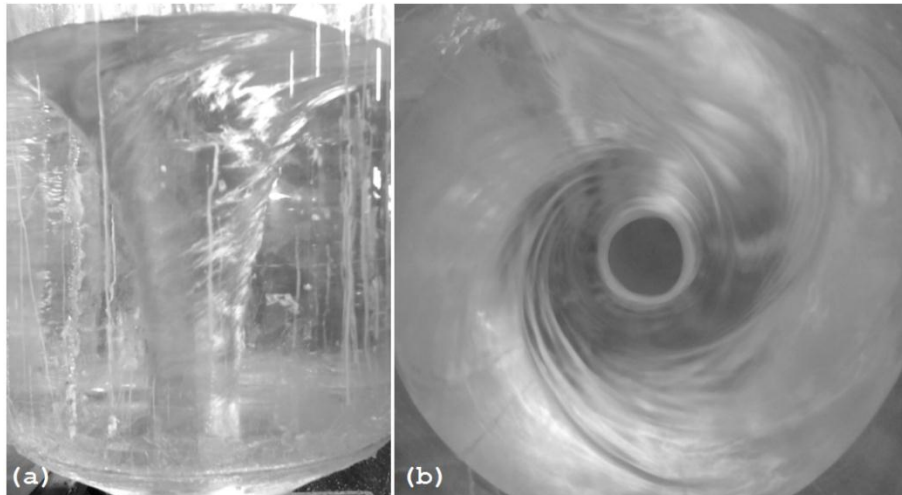


Figura 63 En un dispositivo de fondo cónico (a) vista lateral y (b) vista superior del vórtice formado.

En el desarrollo del vórtice interior (figura 64), realizando el recorrido desde la superficie libre hacia el orificio de descarga en la zona superior; una línea de trayectoria se puede asimilar con la descrita por una espiral logarítmica (azul), que parte desde la frontera del cilindro hasta la frontera de la región media de la siguiente manera.

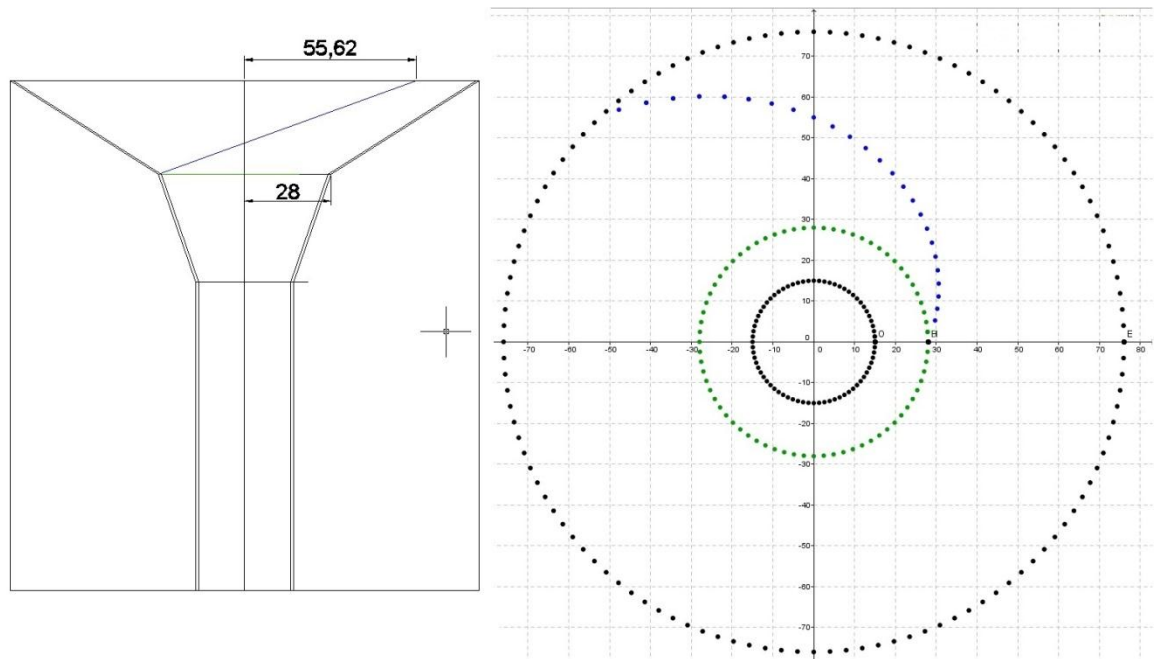


Figura 64 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región superior.

Para el efecto de trazar la curva se usó la fórmula de la espiral logarítmica en coordenadas polares, esto es

$$r_{\text{esplog}} = ae^{b\theta} \quad (37)$$

donde “ a ” es un factor de escala que determina el tamaño de la espiral, mientras “ b ” controla cuan fuerte y en qué dirección está enrollada. Para $|b| > 1$ la espiral se expande con un incremento θ , y para $|b| < 1$ se contrae.

Ahora, la trayectoria que describe una partícula fluida en la región media del vórtice interior (figura 65), se reprodujo con la ecuación de una espiral de Arquímedes.

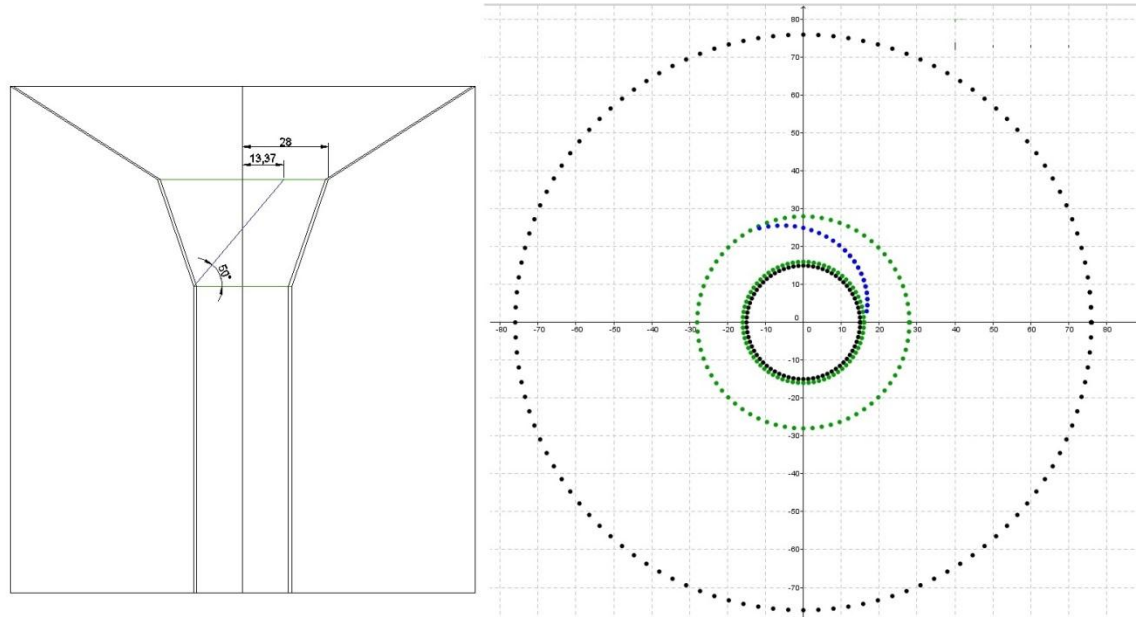


Figura 65 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región media.

La trayectoria de esta espiral inicia en el nivel común a las regiones superior y media, y termina en el nivel que comparten las regiones media e inferior, descrita por la ecuación

$$r_{\text{espArq}} = a + b\theta \quad (38)$$

desarrollada en coordenadas polares, donde " a " y " b " son números reales. Cuando el parámetro " a " cambia, la espiral gira, mientras que " b " controla la distancia en giros sucesivos.

Por último, para la región inferior, la espiral se vuelve de radio constante hasta terminar a través del orificio de descarga, una visualización de la trayectoria se presenta a continuación en la figura 66.

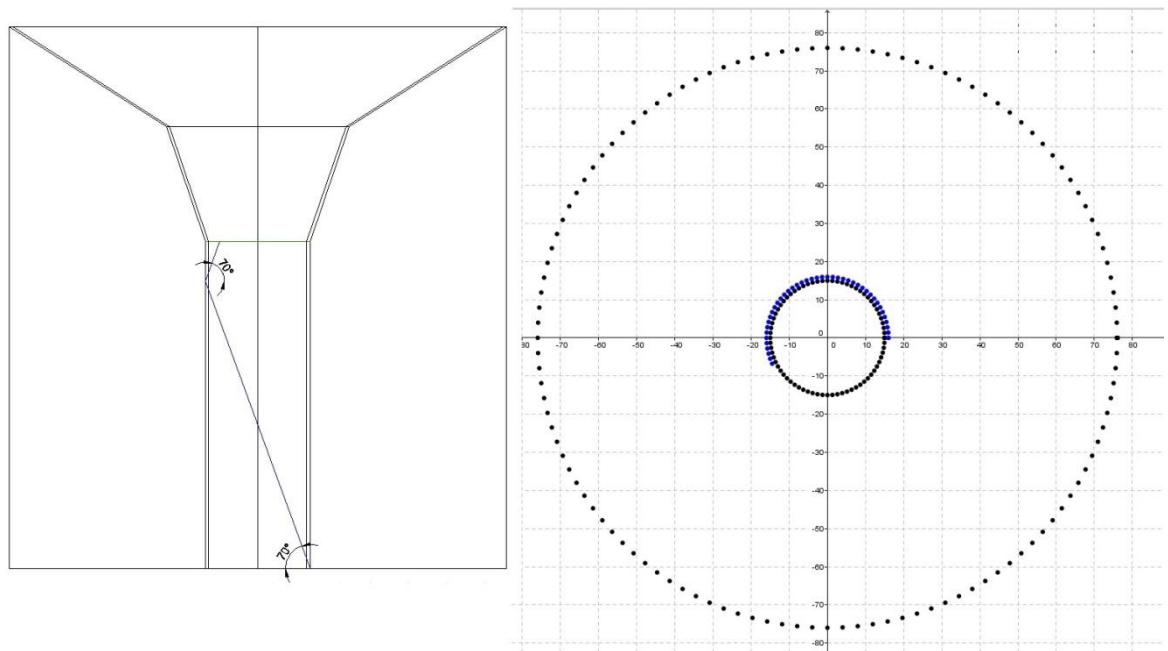


Figura 66 Trayectoria de la partícula fluida en el vórtice interior en la región inferior.

En la región inferior, la trayectoria de la partícula fluida se describe como una espiral de radio constante es decir una espiral cilíndrica.

Para concluir con el vórtice interior, en la figura 67 a continuación se describe la trayectoria de una partícula fluida a lo largo de la altura del vórtice.

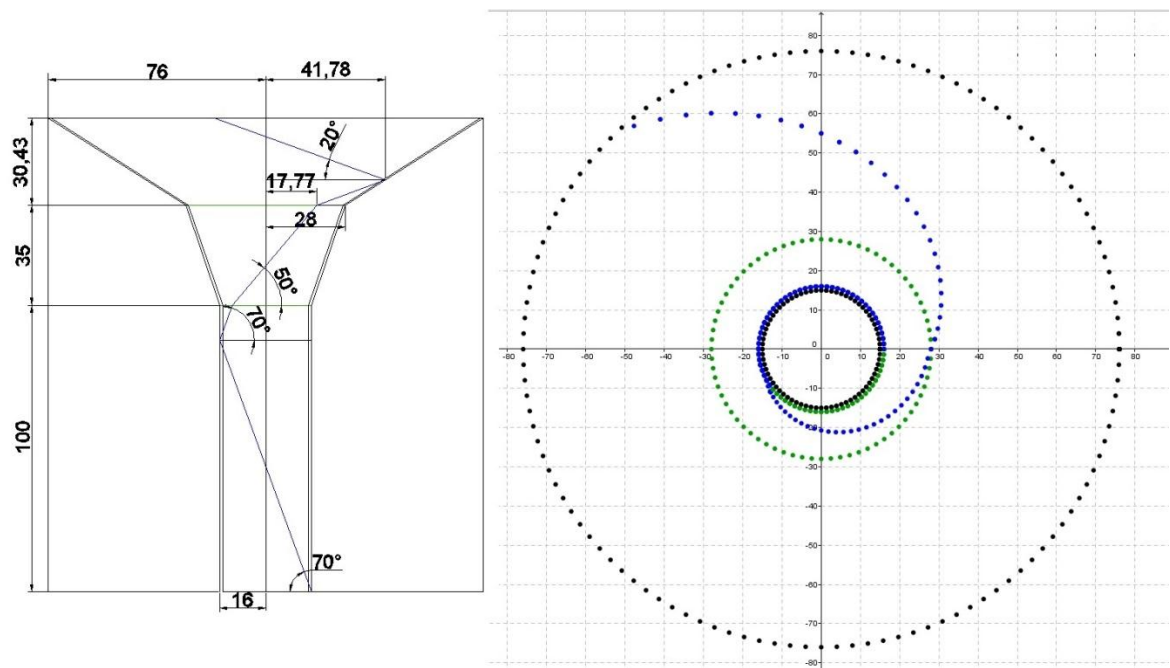


Figura 67 Trayectoria descrita por una partícula fluida en el vórtice interior.

En estudios previos realizados al fenómeno de vórtice en cámara cilíndrica en el laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica (LMF&H), se hizo una estimación de las medidas de los ángulos de estas trayectorias y como varían según la altura del vórtice. Para la zona inferior, los ángulos de las trayectorias respecto a un plano horizontal son de alrededor de 40° a 50° , en la zona media alrededor de 60° y 70° , y en la zona superficial de alrededor de 15° a 20° [27]. Cabe resaltar también que lo presentado es una aproximación a lo que podría ser el fenómeno de vórtice que se presenta por el tipo de cámara. La continuidad de las líneas de corriente se logró implementando la herramienta computacional CAD y el programa GeoGebra®.

Es necesario mencionar que el vórtice de interés es difícil de estudiar porque no hay un marco teórico para este tipo de vórtice; de hecho, no hay claridad sobre qué tipo de vórtice es y por ello se plantea la propuesta de la composición de dos vórtices como una aproximación.

Una posible interpretación de los parámetros adimensionales encontrados es la siguiente:

- $\frac{\omega d}{V_o}, \frac{e\omega}{V_o}$ Número de Strouhal (St), relaciona la oscilación de un flujo con su velocidad media. En los ensayos realizados se observó que este parámetro adimensional crece con la profundidad y con el acercamiento al núcleo de aire.
- $\frac{e}{d}$ Razón geométrica que asocia la cantidad de flujo que entra a la cámara cilíndrica con la cantidad de flujo que se descarga a través del orificio de fondo. De acuerdo con los dispositivos ensayados, la mayor intensidad fue cuando el diámetro de descarga es seis veces mayor que el ancho de la apertura de alimentación.
- $\frac{\Delta h}{d}, \frac{\Delta h}{e}$ Diferencia relativa de alturas del vórtice en el cilindro y del canal semiconvergente que se aprecia visualmente al final del canal de incidencia, esta diferencia es debida al orificio de fondo. Para un caudal de referencia, este parámetro aumenta cuando la razón de aspecto decrece. Esta diferencia genera una pérdida de nivel, es causada cuando la descarga del vórtice es mayor a su alimentación.
- $\frac{V_o}{\sqrt{eg}}$ Número de Froude (Fr), relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad que actúan sobre un fluido. Según la velocidad del flujo incidente, se podía inferir el régimen de flujo. También se pudo apreciar de los cálculos realizados en los dispositivos ensayados que cuando el ancho de la apertura de alimentación aumenta, el flujo tiende de ser supercrítico a ser crítico y cuando el diámetro del orificio de descarga aumenta, el flujo es supercrítico con mayores magnitudes del parámetro adimensional.
- $\frac{V_o e \rho}{\mu}$ Número de Reynolds (Re), caracteriza el movimiento de un fluido relacionando las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas; este parámetro aumenta cuando el caudal en el dispositivo disminuye, en los dispositivos de fondo cónico el flujo incidente al cilindro tiende a

ser turbulento por la alta velocidad de incidencia, mientras que en los planos, el flujo parte en un régimen laminar en la relación de aspecto más baja y a medida que aumenta el flujo se vuelve de transición.

- $\frac{r}{d}$, $\frac{r}{e}$ y $\frac{z}{d}$, $\frac{z}{e}$ son las razones experimentales sobre las cuales se realizaron las mediciones de velocidad angular en el vórtice formado en el dispositivo.

5.1 CONCLUSIONES

En primera instancia, el caudal juega el papel más importante en el dispositivo; esta variable define que tan intenso es el vórtice generado, ya que a mayor caudal la altura de la región inferior será mayor, y es en esta región donde se presentan las velocidades angulares y tangenciales más altas, sobre las que se podría extraer más energía. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el caudal máximo no sobrepase el límite de altura del dispositivo o que la altura de la frontera solida sea modificada para el caudal a manejar. Además, el canal semiconvergente debe tener la capacidad de captar la mayor cantidad de agua posible.

La hidrodinámica del vórtice cambia con cada caudal mostrando que con el máximo caudal el vórtice tiene su máxima intensidad, caracterizada por una relación de aspecto.

Otro factor importante es comprender que el vórtice generado en los dispositivos hidrogeneradores no se comporta como un cuerpo rígido en rotación, más bien sus características hidrodinámicas dependen del nivel y de la región dentro de él, bajo los efectos combinados de la apertura de la alimentación al cilindro y el orificio de descarga. En esta interacción, las velocidades angulares crecen con la profundidad y con la cercanía a la interfase entre el aire y el agua. Por otra parte, las velocidades tangenciales crecen con la profundidad y también, a medida que se acercan al núcleo desde la frontera; esta variable aumenta hasta cierto radio para luego reducirse cerca de la interfase por efecto del orificio de descarga.

Es importante reconocer que para efectos prácticos la zona inferior representa la región donde es plausible la mayor extracción de la energía de rotación.

Tanto el correntómetro para vórtice como el tubo de Pitot, con sus ventajas y desventajas, permitieron visualizar un comportamiento de los dispositivos caracterizados por las diferentes relaciones de aspecto, mostrando que a pesar de ser análisis intrusivos del fenómeno, ayudan de gran manera a la explicación del comportamiento del mismo.

El fondo cónico generó una mejor intensidad puesto que se presentan velocidades de incidencia al cilindro y velocidades tangenciales mayores que las del dispositivo de fondo plano. La relación de aspecto de mayor intensidad es cuando el orificio de descarga es superior a seis veces al ancho de la apertura de alimentación.

La relación que se acerca más al comportamiento favorable del vórtice con fines de generación de energía es aquella que es capaz de utilizar la mayor altura de la cámara. Si el parámetro del ancho de la descarga se aumenta más de seis veces a al ancho de la alimentación, en la cámara cilíndrica habrá menos flujo circulando, quiere decir que generara una menor área de arrastre a lo largo de su altura.

En una aplicación práctica se abren dos campos al uso del dispositivo, el dispositivo puede ser portable e intrusivo en un canal de agua o puede ser modificado para la captación total de un pequeño canal como por ejemplo de riego.

6.1 RECOMENDACIONES

Existen técnicas más especializadas útiles en la construcción del dispositivo hidrogenerador de vórtice, aunque son de mayor costo, vendría bien la construcción del dispositivo utilizando herramientas más especializadas para lo que es el moldeo de la cámara cilíndrica, el doblado del asiento común, los biseles, el pegado, pulido y si se quiere pintado para proteger el acrílico y evitar rayones. Estos evitarían o reduciría defectos producidos bajo la manufactura artesanal.

Se debe tener en cuenta que bajo la relación de aspecto sobre la que se construya un dispositivo, no se presente el régimen de flujo crítico, ya que en este régimen se produce un flujo con muchas alteraciones que puede afectar tanto a la estructura como a la pérdida de energía.

La validación del correntómetro para vórtice como una herramienta de medición es factible realizar con técnicas no intrusivas, como la velocimetría de imágenes de partículas (PIV).

Además, la medición de la velocidad a la entrada de la cámara de vórtice también se realizó con un método intrusivo como lo es el tubo de Pitot, debido a que por el montaje experimental no fue posible la utilización del ADV puesto que no había el espacio necesario para su puesta en uso. Por ello el mismo método de PIV puede ser útil para la verificación de la velocidad medida con el tubo de Pitot, aunque el tubo de Pitot es una herramienta verificada en la medición de la velocidad en canales de flujo libre.

Para efectos prácticos, teniendo en cuenta que el fondo cónico produce una velocidad angular mayor en comparación a un fondo plano, y suponiendo la implementación en el dispositivo de un rodete de radio constante que por efectos de manufactura, no podría ubicarse en la mayor profundidad

posible por la obstrucción de las paredes cónicas, se propone un fondo que sea cónico hasta un radio mayor al del rodete a probar y que luego sea plano con su respectivo orificio de descarga central, para que de esta manera se aproveche la velocidad que pueda entregar el vórtice desde la mayor profundidad.

6.2 REFERENCIAS

- [1] V. Berdinskikh, "Hydrodynamic foundations of free energy physics.," in *In Proceedings of Research Conference*, 2005.
- [2] UPME, "Energias Renovables," [Online]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/EnergiaAlternativa/index.swf>.
- [3] BID, "Banco Interamericano de Desarrollo," 18 junio 2013. [Online]. Available: <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2013-06-18/energia-renovable-de-america-latina-y-el-caribe,10486.html>.
- [4] Hipernova, "Hipernoval," [Online]. Available: <http://www.hipernova.cl/Notas/Energias-renovables-insuficiencia.html>.
- [5] ONU, "ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS," [Online]. Available: <http://www.un.org/es/climatechange/facts.shtml>.
- [6] F. Pino, "OJOCIENTIFICO," 2 agosto 2013. [Online]. Available: <http://curiosidades.batanga.com/2010/09/06/tipos-de-energias-renovables>.
- [7] E. Rodríguez, "Fieras de la Ingenieria," 24 enero 2014. [Online]. Available: <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-fuentes-de-energia-renovables-mas-utilizadas-del-mundo/>.
- [8] C. Uribe, "Escuela de Ingenieria de Antioquia," 19 noviembre 2002. [Online]. Available: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/interes>

antes/centrales/index.htm.

- [9] Endesa S.A., "Endesa," 2012. [Online]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xi.-las-centrales-hidroelectricas.
- [10] Presencia Suiza, "Departamento Federal de Asuntos Exteriores," [Online]. Available: http://www.swissworld.org/es/switzerland/especiales/tecnologias_verdes/energia_gracias_a_remolinos_de_agua/.
- [11] HIDROENERGIA, "Hidroenergia.net," 15 abril 2009. [Online]. Available: http://hidroenergia.net/index.php?option=com_content&view=article&id=103:planta-hidroelectrica-de-vortice&catid=35:innovaciones&Itemid=63.
- [12] Zotleterer, "Gravitational Vortex Power Plant," in *New Energy Congress Clean Energy Technologies*, 2006.
- [13] F. WHITE, *Mecanica de Fluidos*, México D.F.: Mc GrawHill, 1983.
- [14] P. R. Childs, *Rotating Flow*, Imperial College London: FIMechE, FRSA, FHEA, mem.ASME, MIED, BSc(hons), DPhil, CEng, 2011.
- [15] FOX, R. W., MCDONALD, A. T., *Introducción a la Mecanica de Fluidos.*, México D.F.: Interamericana, 1983.
- [16] G. SOTELO, *Hidraulica General*, México D.F.: Limusa, 1997.
- [17] NATIONAL INSTRUMENTS, "National Instruments Corporation," 2014. [Online]. Available: <http://colombia.ni.com/>.
- [18] Allegro MicroSystems, Inc., "3503 RATIOMETRIC, LINEAR,

HALL-EFFECT SENSORS".

- [19] R. Marin, "LABORATORIO DE INTERFACES. Sensores de efecto Hall," [Online]. Available: <http://www0.unsl.edu.ar/~interfases/labs/lab09.pdf>.
- [20] National Instruments, "USER GUIDE NI USB-9162," 2013.
- [21] G. Halász, B. Gyüre, I. Jánosi, K. Szabó and T. Tél, "Vortex flow generated by a magnetic stirrer," p. 8, 2008.
- [22] A. Hilario and P. Carbonell, "Calibración de equipos de medida según ISO 9000," p. 16.
- [23] A. Hilario and P. Carbonell, "CUADERNO TÉCNICO: CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE MEDIDA INDUSTRIALES SEGÚN ISO 9000," Valencia.
- [24] D. LINDLEY, "The Design and Performance of a 6-Cup Anemometer," p. 11, 1975.
- [25] L. FRITSCHEN, "A Sensitive Cup-Type Anemometer," p. 4, 1967.
- [26] Instituto GeoGebra Internacional, "GeoGebra," [Online]. Available: <http://www.geogebra.org/cms/es/>.
- [27] G. Torres, ALGUNAS CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE UN VÓRTICE INDUCIDO EN UN CILINDRO POR UNA CORRIENTE DE AGUA, Cali, 2012.
- [28] R. Pacheco and P. Ruíz, "Ambientum," noviembre 2009. [Online]. Available: <http://www.ambientum.com/revista/2009/noviembre/las-energias-renovables-en-latinoamerica.asp>.
- [29] X. Labandeira, P. Linares and K. Würzburg, "Energias Renovables y Cambio Climatico," *Economics for Energy*, p.

22, 2012.

- [30] B. Villalba, "Energías renovables: ¿alternativa o necesidad?," *ESFINGE*, 2007.
- [31] Math is Fun, "Math is Fun," 2011. [Online]. Available: <http://www.disfrutalasmatematicas.com/datos/desviacion-estandar-calculadora.html>.

6.3 ANEXOS

Velocidad angular en dispositivos de fondo plano.

Tabla 9 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 1.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	40	0.27							
	50	0.28							88
	60	0.28				142	134	127	117
	70	0.31			168	146	144	138	126
	80	0.30		242	229	221	196	163	153
	90	0.30		266	243	238	213	182	160
	100	0.31		274	262	237	216	192	163
	110	0.31	317	314	287	261	229	199	171
	120	0.34	370	349	309	273	244	213	183
	130	0.37	392	373	308	270	246	201	184
	140	0.37	422	379	331	288	263	220	185
	150	0.36	444	400	312	299	264	231	196
	160	0.38	478	404	356	307	269	232	193
	170	0.42	489	434	369	320	277	238	206
0.20	180	0.41	490	443	364	323	285	239	208
	190	0.42	532	455	382	333	295	235	211
	200	0.42	550	467	389	335	296	251	213
	40	0.25							
	50	0.25							
	60	0.25							
	70	0.25			119	128	121	133	109
	80	0.27			186	175	164	150	134
	90	0.27		212	217	206	184	177	154
	100	0.28		272	243	227	205	181	157
	110	0.28	309	303	275	247	218	193	170
	120	0.30	352	326	300	263	237	207	177
	130	0.34	398	367	319	278	247	214	184
	140	0.32	421	383	326	275	250	215	180
0.27	150	0.35	445	382	340	296	263	228	189
	160	0.36	429	410	352	304	254	234	192
	170	0.38	489	427	371	316	278	238	204
	180	0.37	514	450	387	327	285	246	208
	190	0.38	530	461	393	338	296	251	213
	200	0.39	510	468	386	337	278	212	206
	50	0.25							
	60	0.25							
	70	0.27							
	80	0.25			133	128	116	107	101
	90	0.25			186	174	163	145	131
	100	0.27		246	227	209	188	164	144
	110	0.27	251	272	246	226	203	175	153
	120	0.28	328	308	269	245	220	192	161
	130	0.25	359	336	293	254	222	203	168
	140	0.27	383	354	299	263	234	204	173
	150	0.32	419	366	318	278	246	213	180
	160	0.31	412	374	324	278	247	211	185
	170	0.31	460	414	345	292	261	222	190
	180	0.32	474	426	345	303	268	228	192
	190	0.32	471	431	346	312	271	230	198
	200	0.35	521	447	364	311	280	232	199
e/d: Relación ancho de aspecto			Ve(m/s): Velocidad en el ancho de entrada						
z: Nivel de medición			ω (rpm): Velocidad angular del correntometro						

Tabla 10 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 2.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	$\omega 1$ (rpm)	$\omega 2$ (rpm)	$\omega 3$ (rpm)	$\omega 4$ (rpm)	$\omega 5$ (rpm)	$\omega 6$ (rpm)	$\omega 7$ (rpm)
0.17	70	0.311							
	80	0.311						131	142
	90	0.283			168	130	151	122	133
	100	0.297		139	185	171	169	153	130
	110	0.311	163	236	226	213	192	172	148
	120	0.335	267	285	264	240	213	192	169
	130	0.370	301	313	278	257	220	176	169
	140	0.370	330	337	298	262	240	202	172
	150	0.359	388	362	277	280	247	215	184
	160	0.370	432	371	334	282	246	214	185
	170	0.411	412	397	342	291	260	226	195
	180	0.411	457	411	347	301	265	216	199
0.20	190	0.420	481	418	361	317	277	221	199
	200	0.411	463	436	365	315	278	238	195
	70	0.254							
	80	0.254							92
	90	0.269				129	116	133	130
	100	0.283		132	168	164	152	144	131
	110	0.297	210	215	218	204	183	161	142
	120	0.297	233	250	238	221	205	183	158
	130	0.311	294	305	274	247	221	193	166
	140	0.323	344	329	285	251	227	196	163
	150	0.347	372	352	311	273	243	213	177
	160	0.359	343	376	324	280	241	218	179
0.27	170	0.370	429	391	338	296	257	222	191
	180	0.370	482	421	357	305	264	230	196
	190	0.380	481	430	365	314	277	233	202
	200	0.380	451	418	357	307	267	195	195
	80	0.254							
	90	0.254							
	100	0.269			148	142	135	128	127
	110	0.254		168	184	167	159	143	128
	120	0.283	191	241	217	204	187	166	141
	130	0.254	248	278	245	222	202	182	153
	140	0.269	304	299	267	235	211	190	158
	150	0.335	355	334	288	254	221	198	167
	160	0.311	358	332	292	255	229	199	174
	170	0.311	406	380	323	274	240	205	178
	180	0.323	420	395	326	280	252	217	182
	190	0.323	440	401	328	291	257	220	190
	200	0.335	467	415	344	292	261	219	190
e/d: Relación ancho de aspecto			Ve(m/s): Velocidad en el ancho de entrada						
z: Nivel de medición			ω (rpm): Velocidad angular del correntometro						

Tabla 11 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 3.

e/d	z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	100	0.297							
	110	0.297							149
	120	0.335					131	131	137
	130	0.359			186	144	131	146	114
	140	0.370		209	207	190	176	144	135
	150	0.359	240	275	193	210	199	182	148
	160	0.359	325	299	280	248	206	187	160
	170	0.420	343	338	297	257	228	201	178
	180	0.401	384	351	289	270	229	206	172
	190	0.420	394	356	317	288	247	187	182
	200	0.411	385	383	326	276	250	215	181
0.20	100	0.269							
	110	0.283							
	120	0.283							107
	130	0.311		157	190	174	160	147	132
	140	0.323	201	229	210	205	179	156	138
	150	0.335	262	250	237	219	200	175	149
	160	0.370	235	286	258	240	213	183	148
	170	0.380	341	275	274	251	219	197	164
	180	0.370	388	360	312	266	217	196	173
	190	0.380	378	376	311	273	241	203	183
	200	0.380	376	370	315	269	242	180	176
0.27	110	0.254							
	120	0.269							94
	130	0.237			143	143	134	129	144
	140	0.254	131	196	192	164	157	146	127
	150	0.323	216	246	230	209	184	164	143
	160	0.297	253	253	224	209	195	191	148
	170	0.311	299	317	272	237	211	179	160
	180	0.323	339	337	287	246	223	195	160
	190	0.335	394	349	294	263	233	199	173
	200	0.335	396	374	313	263	238	203	170
e/d: Relación ancho de aspecto			Ve(m/s): Velocidad en el ancho de entrada						
z: Nivel de medición			ω (rpm): Velocidad angular del correntometro						

Tabla 12 Velocidad angular dispositivos de fondo plano caudal 4.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	140	0.347							
	150	0.335							
	160	0.370	141	183	156	154	151	136	146
	170	0.411	208	174	224	183	170	163	136
	180	0.411	249	233	208	208	169	157	136
	190	0.411	226	227	237	220	177	142	135
	200	0.401	246	281	239	213	175	177	148
0.20	130	0.269							
	140	0.311							
	150	0.335							
	160	0.347			180	159	147	145	128
	170	0.370	262	195	201	184	173	149	144
	180	0.370	267	250	218	214	168	149	137
	190	0.370	263	274	239	221	195	169	142
	200	0.370	249	266	233	214	193	146	141
0.27	140	0.200							
	150	0.297							
	160	0.311							
	170	0.311		143	137	139	133	111	145
	180	0.297	174	198	190	166	148	140	134
	190	0.323	235	243	219	199	160	152	136
	200	0.323	245	270	222	208	186	160	145
e/d: Relación ancho de aspecto			Ve(m/s): Velocidad en el ancho de entrada						
z: Nivel de medición			ω (rpm): Velocidad angular del correntometro						

Velocidad angular dispositivos de fondo cónico.

Tabla 13 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 1.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	70	0.25							
	80	0.34							
	90	0.28					129	129	126
	100	0.31				161	153	149	145
	110	0.30				196	186	179	161
	120	0.31			235	228	216	200	176
	130	0.37		248	280	264	242	221	193
	140	0.41		310	308	284	263	233	207
	150	0.46		340	327	298	270	241	210
	160	0.46	309	358	342	314	281	255	217
	170	0.39	363	408	362	329	298	264	227
	180	0.48	399	427	378	337	302	269	230
	190	0.49	450	447	396	348	314	271	239
	200	0.44	478	474	411	360	320	287	245
0.13	210		494	477	411	371	328	287	249
	220		536	494	437	375	336	285	237
	90	0.47							
	100	0.43							
	120	0.51							117
	130	0.55						140	140
	140	0.57					154	175	166
	150	0.61				202	214	206	192
	160	0.61				242	239	226	208
	170	0.61			258	278	262	248	224
	180	0.63			303	305	286	264	232
	190	0.60		181	325	318	295	268	241
0.10	200	0.61		247	340	331	309	277	245
	210			337	368	348	320	295	254
	220			369	383	357	327	328	260
	120	0.70							
	130	0.73							
	140	0.73							
	150	0.76							141
	160	0.73						164	167
	170	0.79					196	196	183
	180	0.79				204	227	216	201
	190	0.79				252	244	230	211
	200	0.73				282	272	250	225
	210				284	300	284	262	233
	220			153	318	313	294	270	245

e/d: Relación ancho de entrada diametro orificio. Vo(m/s): Velocidad de alimentación.
z (mm): Nivel de medición ω (rpm): Velocidad angular medida.

Tabla 14 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 2.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	90	0.27							
	100	0.31							106
	110	0.28				136	136	135	127
	120	0.32				178	179	163	155
	130	0.36			230	223	207	193	170
	140	0.40		198	264	251	233	215	187
	150	0.44		247	286	264	240	219	190
	160	0.50	221	316	307	288	260	235	199
	170	0.40	263	356	330	300	277	246	212
	180	0.48	331	382	342	316	284	239	217
	190	0.51	380	407	370	327	294	255	226
	200	0.44	421	431	385	337	300	269	231
	210		442	445	390	344	309	276	236
	220		477	456	407	354	320	272	225
0.13	110	0.40							
	120	0.47							
	130	0.53							
	140	0.55							128
	150	0.61					137	150	159
	160	0.61				165	200	190	176
	170	0.60			169	235	231	224	201
	180	0.62			236	263	258	238	214
	190	0.60			276	289	268	246	220
	200	0.61		120	296	305	284	257	232
	210			268	335	321	296	276	236
	220			315	352	334	306	309	279
0.10	120	0.47							
	130	0.72							
	140	0.72							
	150	0.75							
	160	0.72							130
	170	0.78						157	157
	180	0.79				117	195	190	178
	190	0.77				193	215	206	193
	200	0.74				245	249	228	210
	210				243	273	261	244	221
	220				284	286	272	251	229

e/d: Relación ancho de entrada diametro orificio. Vo(m/s): Velocidad de alimentación.
z (mm): Nivel de medición ω (rpm): Velocidad angular medida.

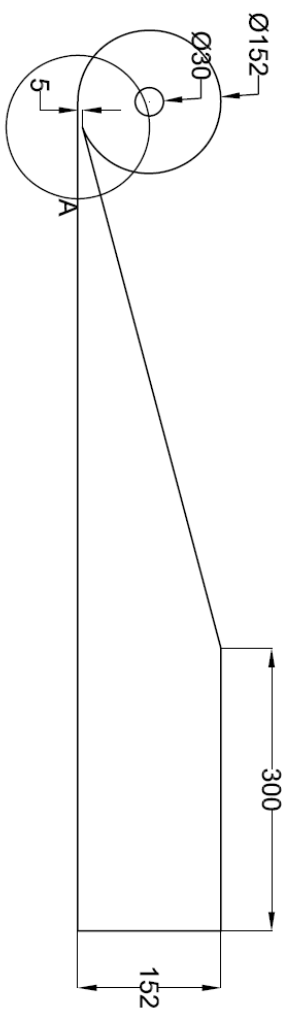
Tabla 15 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 3.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	120	0.32							
	130	0.36						132	146
	140	0.39				180	160	159	145
	150	0.44			186	192	165	167	140
	160	0.50			217	220	204	192	173
	170	0.39		228	261	240	230	208	185
	180	0.49	194	295	273	251	233	223	183
	190	0.50	224	305	308	284	253	223	201
	200	0.44	304	333	325	293	263	239	208
	210		344	376	342	301	279	249	209
	220		365	395	368	317	292	253	205
0.13	140	0.45							
	150	0.60							147
	160	0.60						107	130
	170	0.60				147	161	171	163
	180	0.63				191	214	191	186
	190	0.60			163	236	225	207	194
	200	0.61			233	259	250	230	197
	210			122	271	270	260	245	211
	220			228	308	288	272	275	232
0.10	140	0.28							
	150	0.72							
	160	0.72							
	170	0.76							
	180	0.78						138	141
	190	0.78					132	154	155
	200	0.75				168	194	183	178
	210					231	225	206	198
	220				191	240	229	219	202
e/d: Relación ancho de entrada diametro orificio.						Vo(m/s): Velocidad de alimentación.			
z(mm): Nivel de medición						ω (rpm): Velocidad angular medida.			

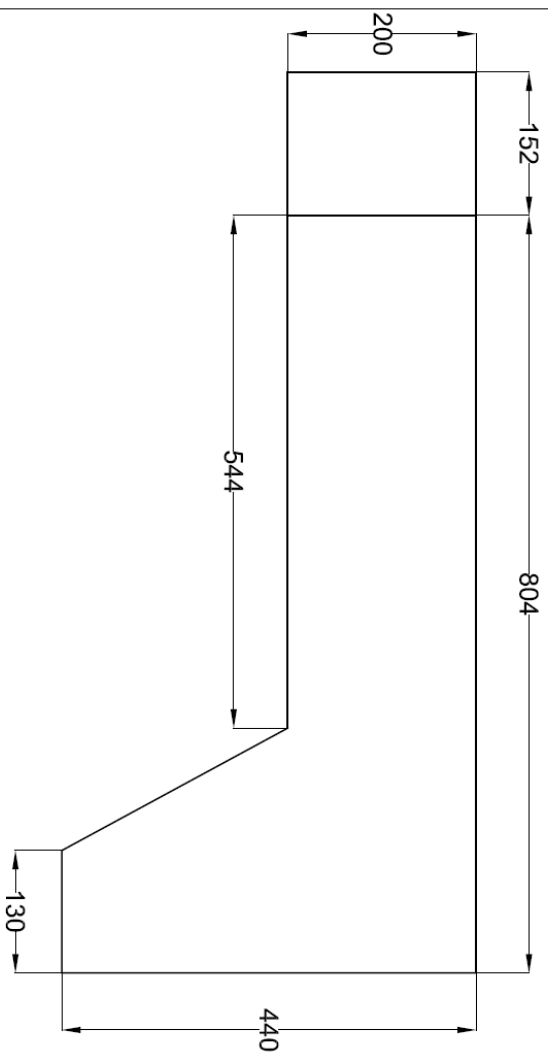
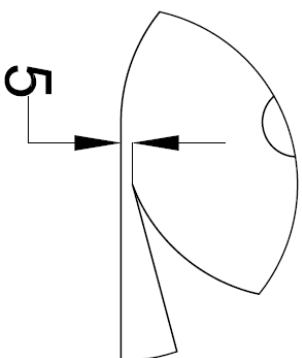
Tabla 16 Velocidad angular dispositivos de fondo cónico caudal 4.

e/d	Z (mm)	Ve (m/s)	ω_1 (rpm)	ω_2 (rpm)	ω_3 (rpm)	ω_4 (rpm)	ω_5 (rpm)	ω_6 (rpm)	ω_7 (rpm)
0.17	150	0.46							
	160	0.49							
	170	0.38					109	127	145
	180	0.48				170	147	142	146
	190	0.51			203	200	185	155	153
	200	0.44		206	219	208	199	177	163
	210		129	245	242	233	213	202	174
	220		224	273	273	259	235	205	157
0.13	170	0.56							
	180	0.60							155
	190	0.59						141	125
	200	0.61				112	144	148	140
	210					170	176	172	155
	220				163	193	188	171	164
0.10	170	0.72							
	180	0.77							
	190	0.77							
	200	0.78							
	210						136	140	134
	220					135	142	131	150
e/d: Relación ancho de entrada diametro orificio.						Vo(m/s): Velocidad de alimentación.			
z(mm): Nivel de medición						ω (rpm): Velocidad angular medida.			

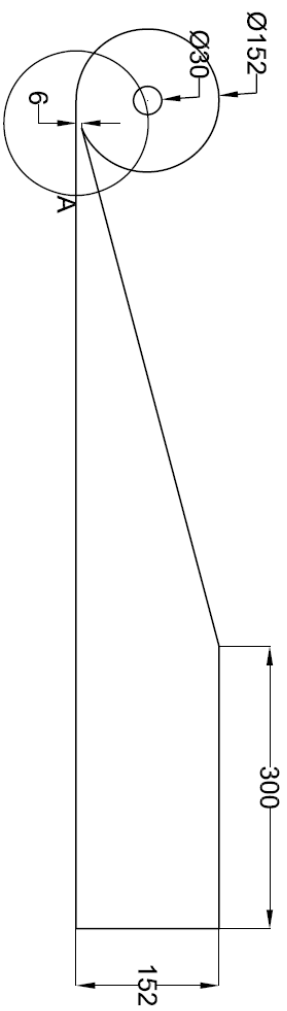
Planos de los dispositivos hidrogeneradores de vórtice de fondo plano y cónico.



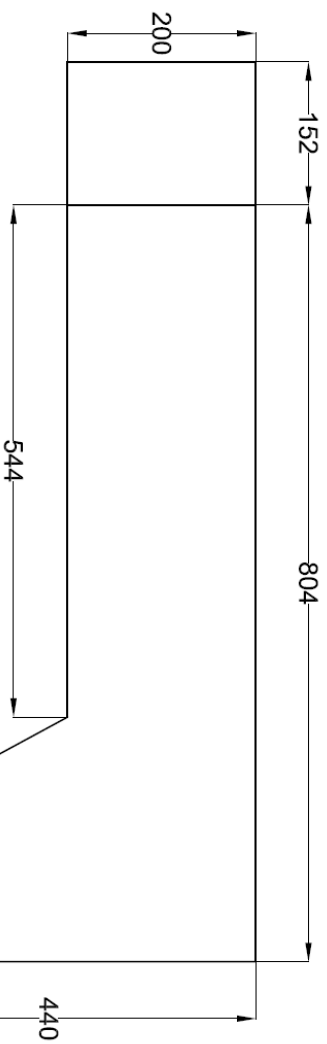
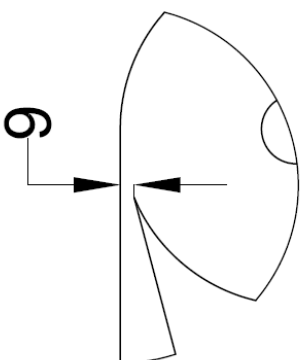
DETALLE A (1:65)



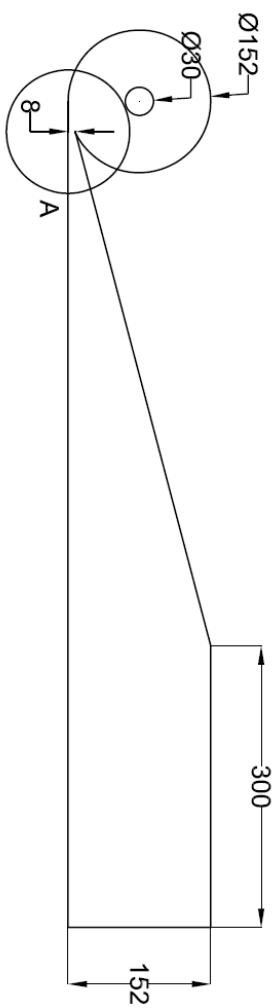
UNIVERSIDAD DEL VALLE	
DISPOSITIVO 1 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE FONDO PLANO	
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA	
ESCALA: 1:160	FECHA: AGOSTO DE 2013



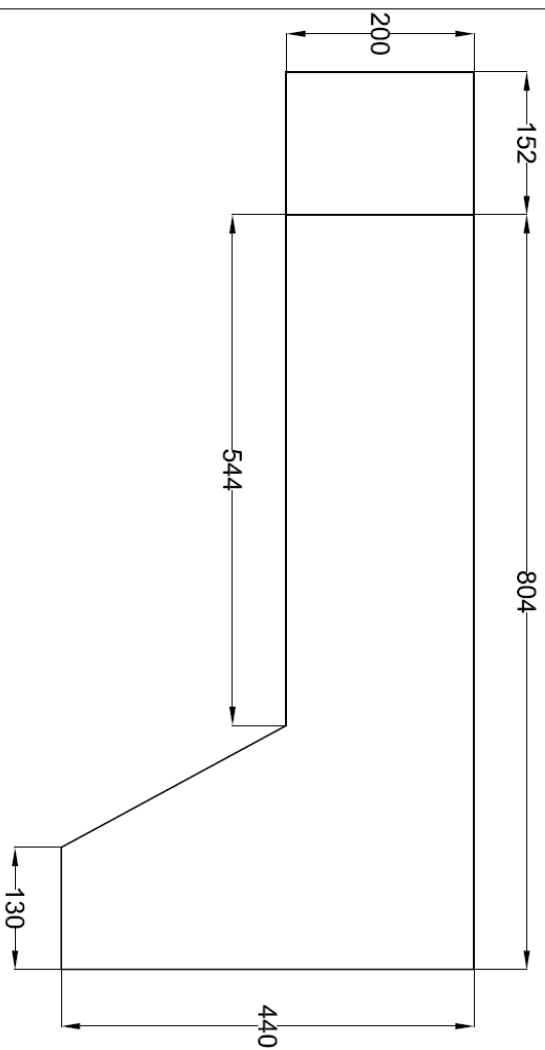
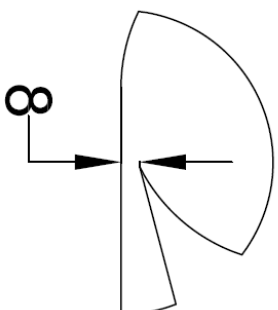
DETALLE A (1:50)



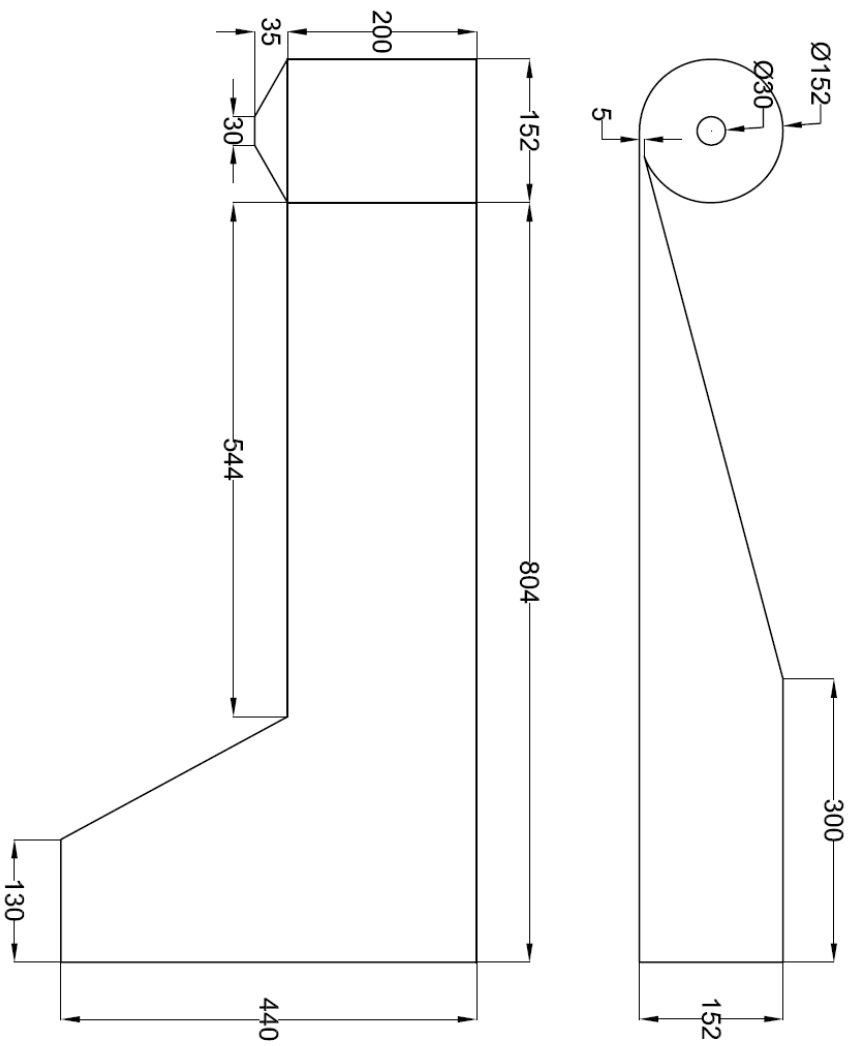
UNIVERSIDAD DEL VALLE	
DISPOSITIVO 2 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE FONDO PLANO	
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA	
ESCALA: 1:160	FECHA: AGOSTO DE 2013



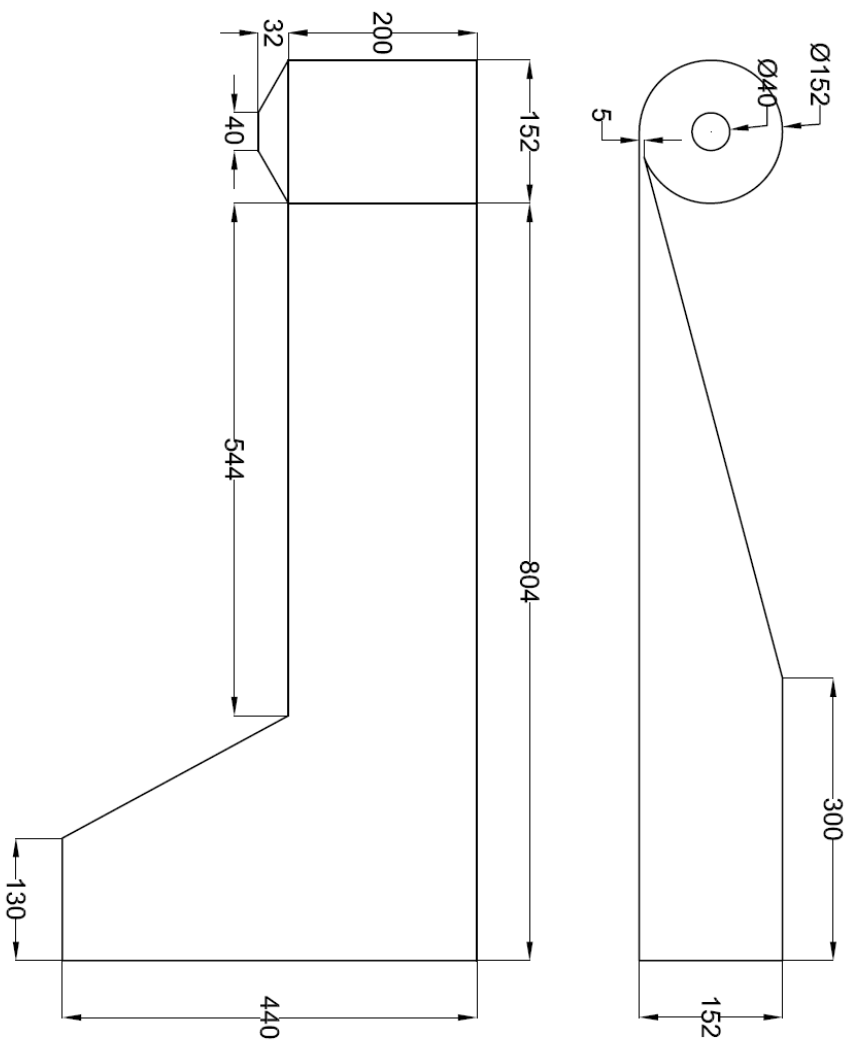
DETALLE A (1:65)



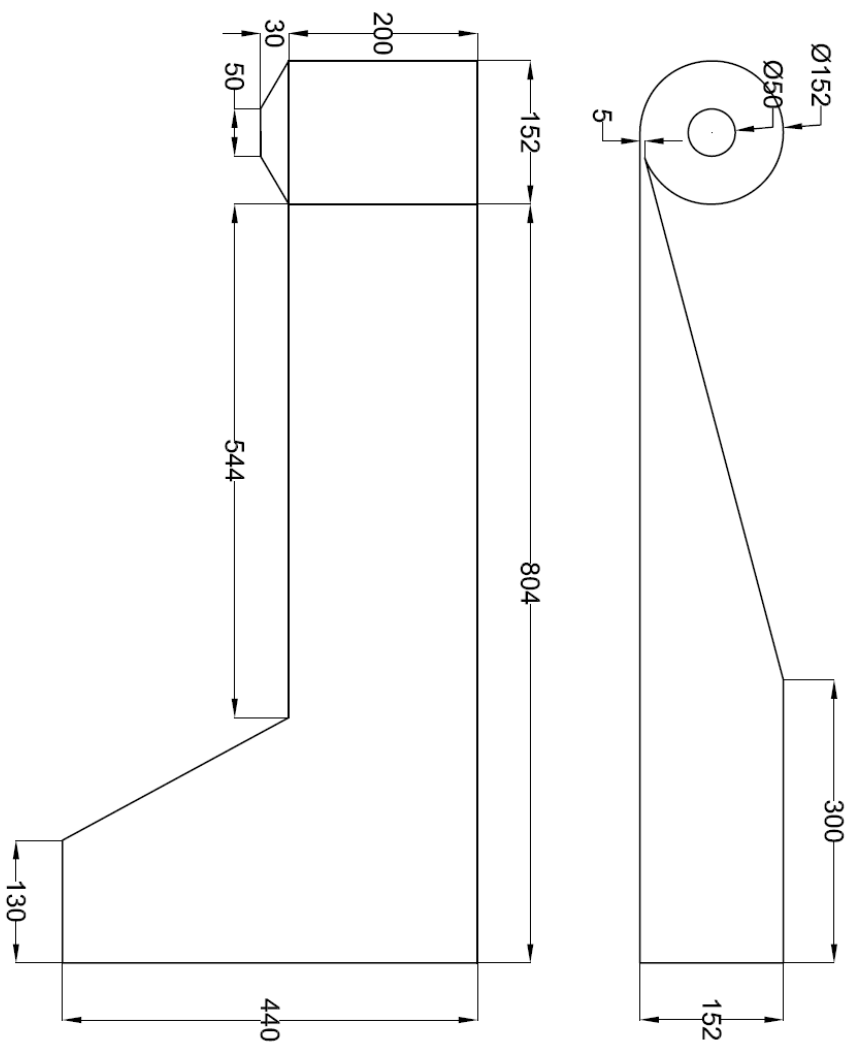
UNIVERSIDAD DEL VALLE	
DISPOSITIVO 3 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE FONDO PLANO	
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA	
ESCALA: 1:160	FECHA: AGOSTO DE 2013



UNIVERSIDAD DEL VALLE
DISPOSITIVO 4 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE
FONDO CÓNICO
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA
ESCALA: 1:160
FECHA: AGOSTO DE 2013



UNIVERSIDAD DEL VALLE
DISPOSITIVO 5 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE
FONDO CÓNICO
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA
ESCALA: 1:160
FECHA: AGOSTO DE 2013



UNIVERSIDAD DEL VALLE
DISPOSITIVO 6 HIDROGENERADOR DE VÓRTICE DE
FONDO CÓNICO
HÉCTOR DANIEL LÓPEZ RIVERA
ESCALA: 1:160
FECHA: AGOSTO DE 2013