

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECANICA

Profesor Patrocinante:
Dr. Ing. Cristian Rodríguez
Dr. Ing. Pablo Cornejo



TRANSICIÓN DESDE EL SPRAY AL ROPING EN HIDROCICLONES

Juan Daza Olave

Informe de Tesis
para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería c/mención en Ingeniería Mecánica

Marzo – 2021

RESUMEN

Los hidrociclones son utilizados en muchas industrias para la clasificación de partículas de acuerdo al tamaño y densidad, entre estas la industria minera, en donde cumplen un rol fundamental en los circuitos de molienda. De acuerdo a la geometría y bajo ciertas condiciones de operación, el hidrociclón puede operar en *roping*, el cual corresponde a una operación defectuosa. Sobre este fenómeno se ha estudiado especialmente el efecto de la geometría del hidrociclón, pero poco se ha estudiado las variables que tienen real influencia en el problema. Es por esto, que en este estudio se busca caracterizar las vibraciones en la transición desde *spray* a *roping* y describir efecto de la distribución granulométrica de alimentación sobre este mismo fenómeno.

Para analizar el impacto de la distribución granulométrica sobre el *roping* se realiza un modelo computacional de un hidrociclón de laboratorio variando presión de alimentación y granulometría de la misma, utilizando el modelo Euleriano y *Reynolds Stress Model* para la descripción de la multifase y la turbulencia. Por otra parte, el hidrociclón utilizado posee una relación de diámetros de descargas de 0,6, por lo que de acuerdo a estudios realizados [Bustamante, 1991; Concha *et al.*, 1996] no debería existir *roping* para ninguna condición de operación. Para los casos en que la granulometría es fina, al aumentar la presión se observa una disminución en el ángulo de descarga y una mejor selectividad. Por otra parte, en los casos en que hay granulometría gruesa, se observa que el hidrociclón opera en *roping* para las presiones altas. La *roping* es directamente proporcional a la presión de alimentación y al grosor de la granulometría de trabajo. De forma general, los resultados obtenidos corresponden a un contraejemplo a autores que sólo han basado el estudio del *roping* en la geometría del hidrociclón.

Replicando el modelo anterior en un hidrociclón de laboratorio diferente se analiza la relación entre fuerza calculada mediante el modelo y la medición experimental de vibración. El modelo replicó fielmente los resultados en *spray*, sin embargo, no replicó el *roping* experimental dando como resultado un *semi-roping*, esto se debe a que experimentalmente se trabajó un *roping* inestable muy cercano a la transición entre estos dos estados. Existe una clara relación entre cantidad de masa contenida dentro del ciclón, fuerza excitatoria numérica y vibración experimental. A pesar que el *roping* no se replicó fielmente en el modelo, de igual forma existe coherencia entre el modelo y la medición, esto se debe a que en un *roping* inicial puede existir aún una porción de núcleo de aire que provoque variaciones en la masa en el tiempo.

Se realiza un set de tres mediciones experimentales *spray*, *semi-roping* y *roping* con el fin de caracterizar las vibraciones en cada condición de operación. En *spray* la amplitud de las vibraciones oscilan de forma leve en el tiempo, luego operando en *semi-roping* la vibración adquiere mayor amplitud y mayor oscilación en el tiempo debido a las fluctuaciones de masa debido al rompimiento y restitución del núcleo de aire, por otra parte, el *roping* se caracteriza por una vibración plana sin variación de amplitudes en el tiempo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
NOMENCLATURA.....	vii
CAPITULO 1.....	1
Introducción	1
1.1. ESTRUCTURA DE TRABAJO.....	1
1.2. HIDROCICLÓN.....	1
1.2.1. <i>Curva de Clasificación y diámetro de corte.....</i>	<i>2</i>
1.2.2. <i>Efecto “fishhook”.....</i>	<i>3</i>
1.2.3. <i>Carga circulante.....</i>	<i>3</i>
1.2.4. <i>Tipo de descarga.....</i>	<i>4</i>
1.2.5. <i>Granulometría.....</i>	<i>4</i>
1.3. ESTADO DEL ARTE.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	7
CAPITULO 2.....	8
Marco teórico.....	8
2.1. ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.....	8
2.1.1. <i>Conservación de la masa.....</i>	<i>8</i>
2.1.2. <i>Conservación del momentum.....</i>	<i>8</i>
2.2. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES.....	9
2.3. TURBULENCIA.....	9
2.3.1. <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).....</i>	<i>10</i>
2.3.2. <i>Reynolds Stress Model (RMS).....</i>	<i>11</i>
2.4. CARACTERÍSTICAS MULTIFASE DEL FLUJO.....	12
2.4.1. <i>Enfoque Euleriano-Euleriano.....</i>	<i>12</i>
2.4.1.1. <i>Modelo Euleriano.....</i>	<i>12</i>
CAPITULO 3.....	15
Impacto de la distribución granulométrica	15
3.1. MODELO COMPUTACIONAL.....	15
3.1.1. <i>Geometría de hidrociclón de estudio.....</i>	<i>15</i>
3.1.2. <i>Volumen de control y discretización.....</i>	<i>16</i>
3.1.3. <i>Condiciones de borde.....</i>	<i>16</i>
3.1.4. <i>Multifase y turbulencia.....</i>	<i>16</i>
3.1.5. <i>Descripción de casos a simular.....</i>	<i>19</i>
3.2. RESULTADOS.....	21
3.2.1. <i>Cálculo y medición de flujos.....</i>	<i>21</i>
3.2.2. <i>Comportamiento del underflow.....</i>	<i>25</i>

3.2.3.	<i>Selectividad.....</i>	29
3.2.4.	<i>Granulometrías.....</i>	31
3.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
3.3.1.	<i>Medición de flujos.....</i>	36
3.3.2.	<i>Comportamiento del núcleo de aire y underflow.....</i>	38
3.3.3.	<i>Curvas de clasificación.....</i>	38
3.3.4.	<i>Granulometrías.....</i>	39
CAPITULO 4.....		40
Relación entre la hidrodinámica operacional y estado vibratorio		40
4.1. MODELO COMPUTACIONAL.....		40
4.1.1.	<i>Geometría de hidrociclón.....</i>	40
4.1.2.	<i>Grilla computacional.....</i>	41
4.1.3.	<i>Descripción de casos a simular.....</i>	41
4.2. RESULTADOS.....		42
4.2.1.	<i>Cálculo de flujos.....</i>	42
4.2.2.	<i>Cálculo de fuerzas.....</i>	43
4.2.3.	<i>Medición de vibración.....</i>	46
4.2.4.	<i>Espectros de fuerza y aceleración.....</i>	47
4.2.5.	<i>Espectro fuerza en el tiempo.....</i>	48
4.2.6.	<i>Espectro aceleración en el tiempo.....</i>	49
4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		53
4.3.1.	<i>Relación entre la masa acumulada y la fuerza excitadora.....</i>	53
4.3.2.	<i>Relación entre la fuerza excitadora y la vibración.....</i>	53
4.3.3.	<i>Integración de análisis.....</i>	53
CAPITULO 5.....		54
Caracterización vibratoria de la transición desde <i>spray</i> a <i>roping</i>		54
5.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		54
5.2. RESULTADOS.....		55
5.2.1.	<i>Forma de onda.....</i>	55
5.2.2.	<i>Espectro de aceleración.....</i>	56
5.2.3.	<i>Espectro de aceleración en el tiempo.....</i>	57
5.2.4.	<i>Valor RMS de la vibración en el tiempo.....</i>	60
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		61
CAPITULO 6.....		62
Conclusiones y perspectivas		62
6.1. CONCLUSIONES.....		62
6.2. PERSPECTIVAS.....		63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrociclón clásico	1
Figura 2. Velocidad axial hidrociclón	7
Figura 3. Curva de clasificación	13
Figura 4. Efecto “fishhook”	14
Figura 5. Descarga hidrociclón.....	15
Figura 6. Ejemplo de curva granulométrica.....	15
Figura 7. Aproximación de Reynolds	15
Figura 8. Geometría hidrociclón	16
Figura 9. Discretización dominio computacional	18
Figura 10. Condiciones de borde	20
Figura 11. Granulometría materiales y mezcla.....	22
Figura 12. Granulometría 1 y 2, experimental y numérica	22
Figura 13. Flujos en descargas del hidrociclón para el primer caso	23
Figura 14. Flujos descarga <i>underflow</i> y <i>overflow</i>	25
Figura 15. Flujo de agua y sólidos en la descarga <i>underflow</i>	25
Figura 16. Flujo de agua y sólidos en la descarga <i>overflow</i>	26
Figura 17. Fracción volumétrica de sólidos en las descargas <i>underflow</i> y <i>overflow</i>	26
Figura 18. Fracción volumétrica de aire	28
Figura 19. Fracción volumétrica sólida	29
Figura 20. Acercamiento <i>underflow</i> modelo computacional	30
Figura 21. Acercamiento <i>underflow</i> experimental	31
Figura 22. Curvas de clasificación experimental y numéricas	32
Figura 23. Curvas de clasificación casos 1, 2 y 3	33
Figura 24. Curvas de clasificación casos 4, 5 y 6	33
Figura 25. Granulometría descargas <i>underflow</i>	34
Figura 26. Granulometría descargas <i>overflow</i>	35
Figura 27. Granulometría descargas <i>underflow</i> y <i>overflow</i> para casos 1, 2 y 3	36
Figura 28. Granulometría descargas <i>underflow</i> y <i>overflow</i> para casos 4, 5 y 6	37
Figura 29. Razón de circulación	39
Figura 30. Geometría hidrociclón en milímetros	41
Figura 31. Granulometrías.....	42
Figura 32. Balance de flujo y masa acumulada, para <i>spray</i> y <i>roping</i>	43
Figura 33. Cargas para caso I.....	44
Figura 34. Cargas para caso II	45
Figura 35. Forma de onda de aceleración para caso I y II	46
Figura 36. Espectro de fuerza y vibratorio para el caso I	47
Figura 37. Espectro de fuerza y vibratorio para el caso II	48
Figura 38. Espectro fuerza en el tiempo para caso I	49
Figura 39. Espectro fuerza en el tiempo para caso II	50
Figura 40. Espectro aceleración en el tiempo para caso I	51

Figura 41. Espectro aceleración en el tiempo para caso II	52
Figura 42. Set-up experimental	53
Figura 43. Forma de onda en <i>spray</i> , <i>semi-roping</i> , y <i>roping</i>	54
Figura 44. Espectro vibratorio en <i>spray</i> , <i>semi-roping</i> , <i>roping</i>	55
Figura 45. Espectro aceleración en el tiempo para <i>spray</i>	56
Figura 46. Espectro aceleración en el tiempo para <i>semi-roping</i>	57
Figura 47. Espectro aceleración en el tiempo para <i>roping</i>	58
Figura 48. Valor RMS de aceleración en el tiempo para <i>spray</i> , <i>semi-roping</i> , <i>roping</i>	59



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condición de descarga de acuerdo a razón de diámetros	2
Tabla 2. Características de grilla	17
Tabla 3. Cuadro resumen condiciones de entrada del modelo	21
Tabla 4. Medición de flujos	24
Tabla 5. Fracciones volumétricas de sólido en descargas	24
Tabla 6. Desviación estándar sobre la media	27
Tabla 7. Variación promedio numérico respecto valor experimental	27
Tabla 8. Descripción <i>underflow</i>	30
Tabla 9. Diámetro de corte	31
Tabla 10. Características de grilla	39
Tabla 11. Casos de estudio	41
Tabla 12. Flujos y concentraciones	42
Tabla 13. Integración de resultados	43
Tabla 14. Caracterización vibratoria y relación con núcleo de aire	44



NOMENCLATURA

A	: Área interfacial
C_{ij}	: Derivada convectiva
C_D	: Coeficiente de arrastre
$D_{T,ij}$: Difusión turbulenta
$D_{L,ij}$: Difusión molecular
d	: Diámetro
F_{ij}	: Producción por sistema rotatorio
f	: Función de arrastre
g	: Aceleración de gravedad
G_{ij}	: Producción de sustentación
K_{pq}	: Coeficiente de intercambio de momentum
\dot{m}	: Flujo másico
p	: Presión
P_{ij}	: Producción de esfuerzo
Re	: Número de Reynolds
S	: Término fuente
t	: Tiempo
u	: Velocidad local
V	: Volumen
v	: Velocidad de interface



Símbolos griegos

α	: Fracción volumétrica
δ_{ij}	: Delta de Kronecker
ε_{ij}	: Disipación turbulenta
λ	: Viscosidad de cuerpo de fase
μ	: Viscosidad dinámica
ρ	: Densidad
τ	: Esfuerzo de corte
$\bar{\tau}$: Tensor deformación-esfuerzo
ϕ_{ij}	: Presión-deformación

Subíndices

l	: líquido
o	: <i>overflow</i>
q	: q-ésima fase
s	: sólido
u	: <i>underflow</i>
w	: agua

CAPITULO 1

Introducción

1.1. Estructura de trabajo.

Este informe de memoria de título está estructurado en seis capítulos, donde el primer capítulo corresponde a la introducción, el cual trata de la estructura de trabajo, una descripción general de los hidrociclones, el estado del arte, y los objetivos del trabajo. El segundo capítulo contiene el marco teórico esencial para la comprensión del problema, compuesto por la teoría de mecánica de fluidos y los modelos computacionales en los que se basará el trabajo. El tercer capítulo da a conocer el modelo computacional a emplear en simulaciones, y las condiciones de operación consideradas en el trabajo. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la modelación numérica y su comparación con trabajo experimental realizado. En el quinto capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, el sexto capítulo contiene las conclusiones y perspectivas del trabajo.

1.2. Hidrociclón.

El hidrociclón es un dispositivo que actúa como clasificador en distintos circuitos, ya sea en el procesamiento de minerales, alimentos, industria farmacéutica, química, etc debido a que posee un diseño simple, buen rendimiento, bajos costos de operación y de mantención [Reddy *et al.*, 2016]. En la Figura 1 se presenta un hidrociclón clásico.

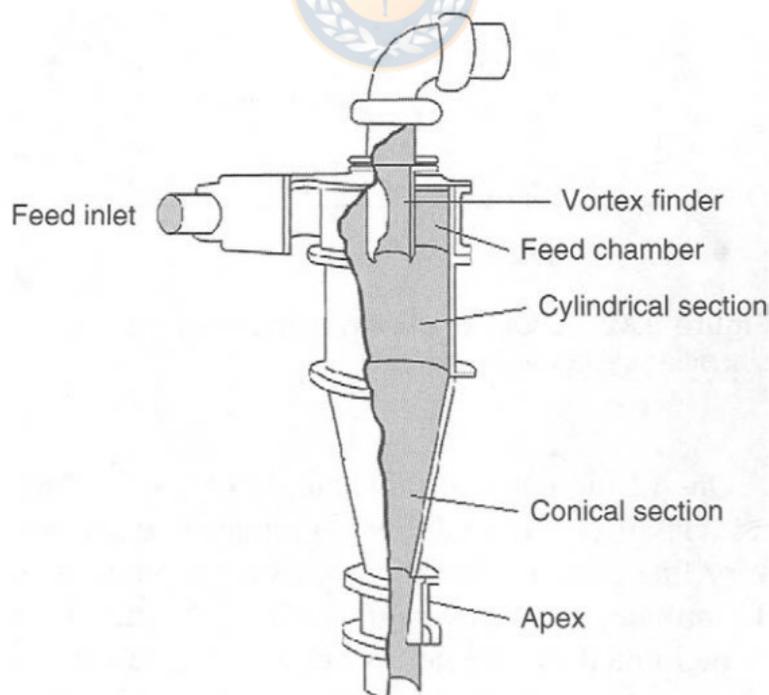


Figura 1. Hidrociclón clásico.

En el hidrociclón se puede distinguir con claridad una región cilíndrica y una zona cónica. La alimentación entra tangencial en el extremo superior de la zona cilíndrica, guiado por la geometría del hidrociclón, tiende a formar un flujo tipo vórtice. Debido a la rotación de las partículas, se genera una fuerza centrífuga que tiende a impulsarlas hacia la pared del hidrociclón, mientras que el arrastre del agua se opone a dicha fuerza centrífuga, por lo que se genera una distribución radial de partículas en el hidrociclón, donde las partículas de mayor diámetro y densidad se ubican en regiones cercanas a la pared, mientras que las partículas pequeñas en masa se ubican en regiones cercanas al eje axial del hidrociclón. Luego el grupo de partículas de mayor masa bajan por la zona cónica hacia el *apex* formando un flujo de descargar inferior (*underflow*). Por otro lado, las partículas más livianas son descargadas por *vortexfinder*(*overflow*). En la Figura 2 se presenta un diagrama de velocidades axiales dentro de un hidrociclón, donde es apreciable la dirección de flujo. Por otro lado, debido a la tendencia de las partículas a acumularse en las paredes del hidrociclón, se forma un núcleo de aire en el eje axial de este.

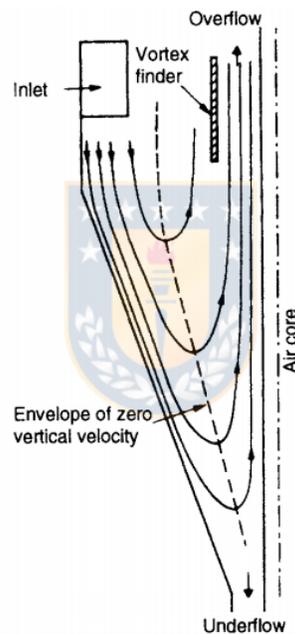


Figura 2. Velocidades axiales hidrociclón.

1.2.1. Curva de Clasificación y diámetro de corte.

La eficiencia del hidrociclón, se puede observar mediante la curva de clasificación. Ésta es representada por el porcentaje de cada tamaño que es descargado en el *underflow*. Además, de la curva se puede obtener el tamaño de corte, el cual corresponde al tamaño tal que la mitad de las partículas son descargadas en el *underflow* y la mitad restante en el *overflow*. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de curva de clasificación.

El tamaño de corte coincide con la línea de velocidad vertical nula presente en la Figura 2, ya que, las partículas sobre esta línea tienen la misma posibilidad de formar parte del *overflow* como del *underflow*. Mientras mayor sea la pendiente en punto de corte, mayor es la eficiencia del hidrociclón. La curva ideal del hidrociclón se compone suponiendo que todas las partículas mayores al tamaño de corte son descargadas en el *underflow*, de acuerdo al comportamiento mostrado en la Figura 3.

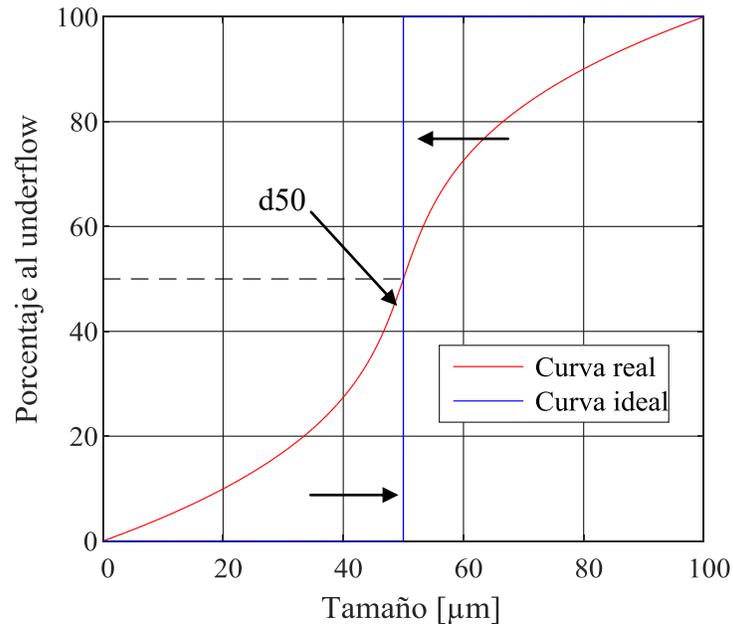


Figura 3. Curva de clasificación

1.2.2. Efecto “fishhook”.

De forma teórica, las partículas de menor tamaño se distribuyen radialmente hacia el centro del hidrociclón y son descargadas en el *overflow*, sin embargo, se han reportado casos en que los tamaños más pequeños son descargados en gran cantidad en el *underflow*. Esto se conoce como efecto “*fishhook*”, en la Figura 4 se muestra una curva de clasificación donde se puede apreciar este fenómeno. Cabe destacar que éste ocurre principalmente en tamaños pequeños, del orden de 10 [μm].

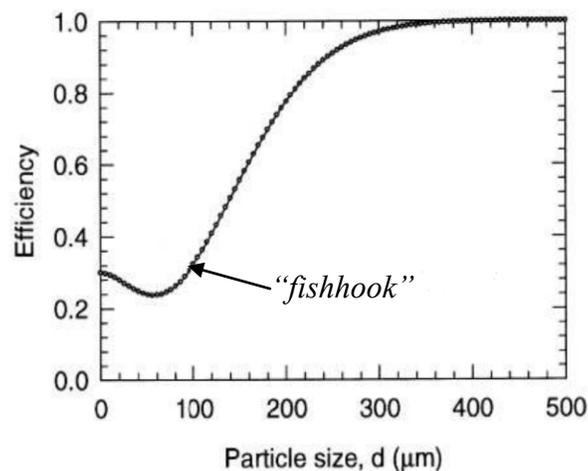


Figura 4. Efecto “*fishhook*”.

1.2.3. Carga circulante.

En los ciclos de molienda, la carga circulante corresponde al material grueso que es retornado por el hidrociclón al molino. Para tasar el nivel de carga circulante, se utiliza la razón de circulación, la cual corresponde a la razón entre el flujo *underflow* y el flujo *overflow* en base sólida.

1.2.4. Tipo de descarga.

De acuerdo a la geometría y condiciones de operación, la descarga *underflow* puede ser tipo *spray* o tipo *roping*. La primera se caracteriza por un buen desempeño en la clasificación del hidrociclón, mientras que en el *roping* cambia la selectividad del equipo. En la Figura 5 se muestra una descarga tipo *roping* y una descarga tipo *spray*.

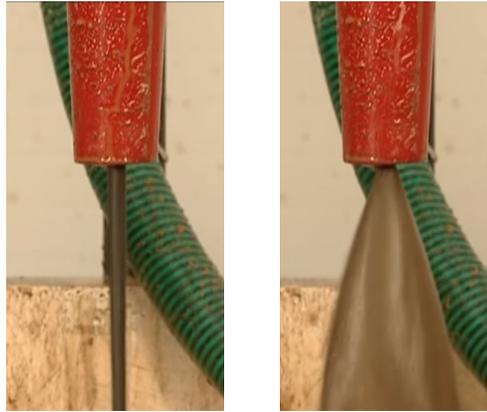
(a) *Roping*(b) *Spray*

Figura 5. Descarga hidrociclón

1.2.5. Granulometría.

La caracterización de un material granular se realiza mediante una curva granulométrica, la cual da a conocer la estructura del mismo de acuerdo al tamaño de partículas que lo conforma. El material granular es separado utilizando tamices estandarizados, luego se identifica la cantidad de material que retiene cada tamiz. Los tamices gruesos permiten el avance de mayor cantidad de material en comparación a tamices más finos. En la Figura 6 se muestra la curva granulométrica de dos materiales.

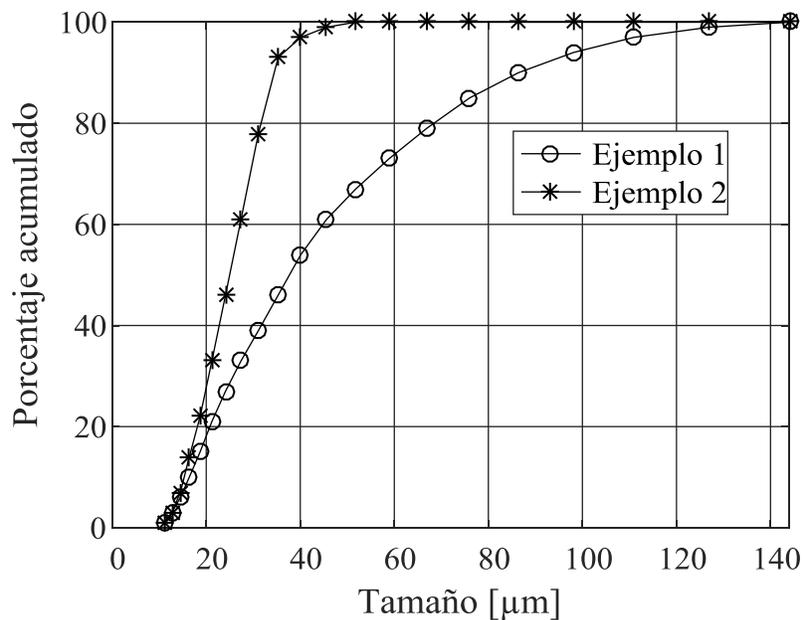


Figura 6. Ejemplo de curva granulométrica.

De acuerdo al caso de la Figura 6 se puede observar que la curva granulométrica “ejemplo 2” se encuentra desplazada hacia la derecha respecto a la “ejemplo 1”, esto indica que el “material 2” es más grueso que el anterior. Por otra parte, cuando una curva está más inclinada, implica que el material descrito posee mayor cantidad de tamaños de partículas que lo componen.

1.3. Estado del arte.

Para comprender el funcionamiento de los hidrociclones se ha planteado distintos métodos experimentales de análisis, desde Tomografías Eléctricas de Impedancia (EIT) [Gutiérrez *et al.*, 2000], Velocimetría Doppler Láser (HVS), hasta grabaciones de video para observar el flujo en el interior de estos quipos [Van Vuuren *et al.*, 2011]. Pero debido a que en el comportamiento de un hidrociclón existen múltiples factores que intervienen, tales como la velocidad de alimentación, la concentración de sólidos en ésta, el tamaño de las partículas en el flujo, la geometría del hidrociclón, etc., es que estas soluciones experimentales pierden versatilidad, ya que solo se limitan al estudio de un caso particular. Por otra parte, la Dinámica de Fluidos Computacional se convierte en la herramienta esencial para el estudio de los hidrociclones, debido a que da al investigador la posibilidad de estudiar múltiples casos, variando las condiciones de operación, y pudiendo predecir el comportamiento del flujo con gran detalle.

La mayoría de las investigaciones se centran en el comportamiento de la curva de clasificación del hidrociclón [Chuet *et al.*, 2012; Delgadillo and Rajamani, 2005; Wang *et al.*, 2011] y su optimización [Delgadillo y Rajamani, 2007; Olson y Van Ommen, 2004], otros analizan el comportamiento del núcleo de aire interior [Narasimha *et al.*, 2006], y algunos se enfocan en el análisis del flujo interno del hidrociclón [Cullivan *et al.*, 2004]. Pocos han estudiado el *roping* y las variables que interfieren en este [Bustamante, 1991; Concha *et al.*, 1996].

De acuerdo a pruebas experimentales realizadas [Bustamante, 1991; Concha *et al.*, 1996], se puede asociar la razón entre el diámetro del ápex y el diámetro del vortexta las condiciones de descarga mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Condición de descarga de acuerdo a razón de diámetros.

<i>Underflow</i>	Bustamante, 1991	Concha <i>et al.</i> , 1996
<i>Roping</i>	$d_u/d_o < 0,34$	$d_u/d_o < 0,45$
<i>Semi-roping</i>	$0,34 < d_u/d_o < 0,50$	$0,45 < d_u/d_o < 0,56$
<i>Spray</i>	$0,50 < d_u/d_o < 0,90$	$0,56 < d_u/d_o$

Cabe destacar que el estado de *semi-roping* es dependiente de otros factores, como por ejemplo la presión, densidad de partículas granulares de flujo, etc., por lo que para ese rango también puede darse un caso de *roping* o *spray*.

Debido a la geometría del hidrociclón, y la forma tipo torbellino que adquiere el flujo dentro de este, existe una alta turbulencia, lo que vuelve compleja su modelación. Por otra parte, se debe tener en

cuenta la existencia de la multifase, debido al núcleo de aire, las partículas suspendidas en el fluido y la cantidad de diámetros distintos de estas [Reddy *et al* 2016].

La modelación de la turbulencia asociada al problema por lo general se ha realizado utilizando el modelo *Reynolds Stress Model*(RMS) [Cokljatet *al.*, 2006;Ghodratet *al.* 2016,Reddyet *al.*, 2016;Wang *et al.*, 2007; 2011], dando buenos resultados para las velocidades axiales y tangenciales [Delgadillo y Rajamni, 2007] y además del dimensionamiento del núcleo de aire [Narasimhaet *al.*, 2006]. También se ha utilizado el modelo k-épsilon [Swain and Mohanty, 2013],pero otros estudios sugieren que la turbulencia en hidrociclones es bastante anisotrópica para utilizar este modelo [Slacket *al.*, 2000; Suasnabaret *al.*, 2000], es por esto que se recomienda la utilización del modelo RSM, aunque su coste computacional sea mayor [Pérez *et al.*, 2017].

Las partículas presentes en el flujo se han tratado de distintas formas. Se han utilizado modelos de enfoque Euleriano-Euleriano tales como el Modelo de Mezcla [Kuanget *al.*, 2012], modelo Euleriano[Cokljatet *al.*, 2006], modelo Euleriano completo [Huang, 2015]y el *Two Fluid Model*(TFM) [Ghodratet *al.* 2016]. También se tienen modelos con enfoque Lagrangiano-Euleriano donde uno de los más utilizados es el *DiscretePhaseModel*(DPM) [Pérez *et al.*, 2017] y su variante el *Dense DiscretePhaseModel*(DDPM) [XizhongChenet *al.*, 2014]. El *DiscretePhaseModel* tiene limitaciones respecto a la fracción volumétrica, ya que entrega buenos resultados cuando esta es igual o menor a 10%, es por esto que en casos en que la fracción volumétrica es mayor se recomienda la utilización del *Dense DiscretePhaseModel*. Una clara ventaja que poseen los modelos DPM y DDPM es que la fase granular puede ser descrita como distribución granulométrica, por el contrario, en los modelos eulerianos sólo se puede tener un diámetro por cada fase granular.

Las investigaciones enfocadas al estudio del núcleo de aire, se basan principalmente en el modelo *Volume of Fluid* (VOF), debido a que tiene especial énfasis en el cálculo de la interface agua-aire [Ghodratet *al.* 2016].

En la mayoría de las investigaciones la simulación del hidrociclón se separa en dos o tres fases. En la primera se da origen al núcleo de aire utilizando el *Reynolds Stress Model* (RSM) y el modelo *Volume of Fluid* (VOF) [Ghodratet *al.* 2016; Pérez *et al.*, 2017]. Cuando ya se alcanza una estabilidad se procede con la segunda etapa donde se configura el modelo multifase utilizado que incluye la caracterización de las partículas presentes en la fase sólida.

De acuerdo a un estudio realizado [Pérez *et al.*, 2017], en donde se simuló varios casos de flujos de alimentación y diámetro de partículas en suspensión, los diámetros pequeños generan descarga de tipo *spray*, mientras que, al aumentar el diámetro de las partículas y la velocidad de alimentación se tiende a una descarga tipo *roping*. En esta simulación solo se consideró un diámetro de partículas interactuando entre sí para cada simulación, por lo que utilizando las herramientas de CFD se plantea el desarrollo de un modelo que pueda caracterizar distintos diámetros de partículas actuando simultáneamente y su efecto en la descarga del hidrociclón (*undeflow*). Se concluyó además, que una forma sencilla de detectar la transición desde *spray* a *roping* es identificar los cambios en el espectro frecuencia de la presión sobre la pared del hidrociclón, tal que *spray* se caracteriza por altas amplitudes a bajas frecuencias y en *roping* existe una señal ruidosa y amplitudes menores en frecuencias menores.

1.4. Objetivos.

El objetivo general de esta investigación es estudiar la transición operacional desde *spray* a *roping* en hidrociclones.

Los objetivos específicos considerados son:

- Implementar un modelo CFD de un hidrociclón de laboratorio mediante el uso del software Gambit 2.4.6. y el código comercial ANSYS Fluent 17.2.
- Validar los resultados utilizando datos obtenidos de mediciones experimentales con un hidrociclón de laboratorio.
- Analizar el impacto de distintas distribuciones granulométricas sobre la descarga del hidrociclón, haciendo especial énfasis en el *roping*.
- Analizar la relación entre la fuerza producida por flujo interno sobre las paredes del hidrociclón y su relación con el estado vibratorio del equipo.
- Caracterizar la transición vibratoria del hidrociclón desde *spray* a *roping*.



CAPITULO 2

Marco teórico

2.1. Ecuaciones de conservación.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan el movimiento de los fluidos son:

- 1.- Ecuación de conservación de la masa
- 2.- Ecuación de conservación del momentum

2.1.1. Conservación de la masa.

Este principio indica que la tasa de cambio de la masa en un volumen de control definido es equivalente al flujo neto de masa saliendo a través de las superficies que rodean el volumen. En la ecuación (1) se muestra la representación diferencial de la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Para un escurrimiento incompresible se tiene (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1) se tiene la ecuación (3).

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

2.1.2. Conservación del momentum.

Este principio indica que la tasa de cambio del momentum en un volumen de control definido sumado al flujo de momentum saliendo a través de las superficies que rodean al volumen es equivalente a la sumatoria de fuerzas sobre este. La ecuación diferencial de conservación de momentum queda expresada en la ecuación (4).

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

2.2. Ecuaciones de Navier-Stokes.

Estas son un conjunto de ecuaciones de derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido newtoniano. En la ecuación (5) se presenta la ecuación constitutiva.

$$\tau_{ij} = -\left(p + \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{u}\right) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Esta ecuación es sustituida en la ecuación de Cauchy (4), además considerando escurrimiento incompresible da como resultado la ecuación (6).

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (6)$$

2.3. Turbulencia.

La mayoría de los flujos que se encuentran en la naturaleza y con aplicación en ingeniería son de naturaleza turbulenta. Los flujos turbulentos poseen las siguientes características (PijushKundu, 2008):

- Aleatoriedad. Los flujos turbulentos son irregulares, caóticos e impredecibles.
- No linealidad. Los flujos turbulentos son altamente no lineales. Esto hace que el parámetro de no linealidad número de Reynolds exceda un valor crítico. La no linealidad de un flujo turbulento resulta en el estiramiento del vórtice, proceso clave por el cual los flujos turbulentos tridimensionales mantienen sus vorticidad.
- Difusividad. Los flujos turbulentos se caracterizan por una rápida velocidad de difusión térmica de momento y calor, esto debido a la mezcla macroscópica de las partículas de fluido.
- Vorticidad. La turbulencia se caracteriza por altos niveles de vorticidad fluctuante. Esto es visible en las estructuras turbulentas presentes llamadas torbellinos. Estos torbellinos se encuentran limitados por la geometría que los contiene, y la cantidad de energía presente en ellos depende del tamaño.
- Disipación. Los torbellinos de mayor tamaño poseen mayor energía, la cual va descendiendo a torbellinos más pequeños hasta que es disipada en forma de calor por efecto de la viscosidad. Es por eso que los flujos turbulentos requieren un suministro continuo de energía para compensar las pérdidas viscosas.

Para la modelación de la turbulencia existen tres enfoques clásicos, los que se clasifican de acuerdo al rango de escalas turbulentas que resuelven. Estas categorías son:

- Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Este modelo es de bajo costo computacional, además los resultados que entrega son bastante útiles para usos de ingeniería, es por esto que se convierte en una de las principales herramientas de análisis de flujos turbulentos. Esta modelación se basa en el promedio de Reynolds propuesto en 1895, donde descompone la velocidad en una componente promediada en el tiempo y una componente que representa la variación de la velocidad respecto al promedio.

- Large Eddy Simulation (LES). Este tipo de modelación de la turbulencia se basa en un filtrado espacial de las estructuras turbulentas, esto implica que resuelve las estructuras turbulentas de mayor tamaño y parametriza las más pequeñas utilizando los modelos de subgrilla. Para esto se requiere una grilla más fina que en el caso de una modelación RANS por lo que tiene un costo computacional más elevado.
- Direct Numerical Simulation (DNS). Esta modelación resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes de forma directa, por lo que requiere un mallado bastante fino para abarcar todo tipo de estructuras turbulentas incluyendo hasta la escala de Kolmogorov. El costo computacional es bastante más alto que las dos anteriores, por lo que no es utilizado para soluciones ingenieriles.

2.3.1. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS).

La promediación de Reynolds se muestra en la ecuación (7).

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (7)$$

Donde \bar{u} es el valor promedio de la velocidad y $u'(t)$ es la variación respecto al promedio de la misma. Lo anterior queda claramente expuesto en la Figura 7.

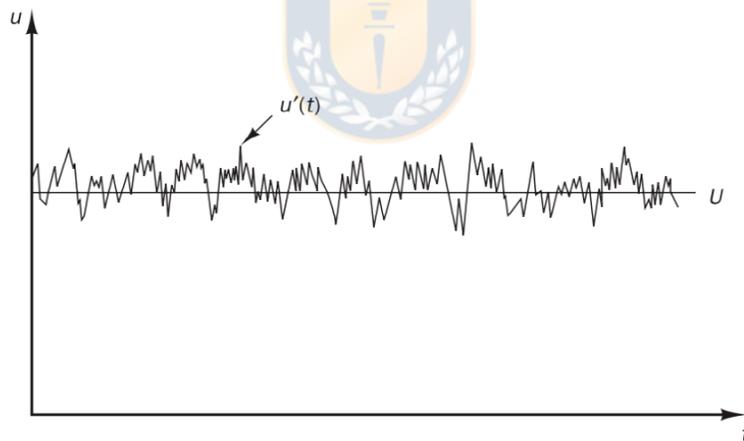


Figura 7. Aproximación de Reynolds.

Reemplazando (7) en (6) se tiene.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (8)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Navier-Stokes promediada en el tiempo, donde aparece un término adicional $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ que es conocido como el tensor de esfuerzo de Reynolds, el cual representa los efectos de la turbulencia en el flujo.

2.3.2. Reynolds Stress Model (RMS).

El Reynolds Stress Model (RMS) es el modelo de turbulencia más elaborado que proporciona ANSYS Fluent. Este modelo abandona la hipótesis de isotropía de la viscosidad de torbellinos, y calcula todas las componentes del tensor esfuerzo de Reynolds agregando una ecuación para la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. Esto quiere decir que para un escurrimiento bidimensional se calculan cinco ecuaciones, mientras que para un escurrimiento tridimensional se calculan siete ecuaciones. En la ecuación (9) se presenta la ecuación de transporte que emplea el método.

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t} + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user} \quad (9)$$

De los cuales

$\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t}$: Cambio local en el tiempo
$C_{ij} = \frac{\partial(\rho x_k \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k}$: Derivada convectiva
$D_{T,ij} = -\frac{\partial [\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + \overline{p'(\delta_{kj} u_i' + \delta_{ik} u_j')}]}{\partial x_k}$: Difusión turbulenta
$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial(\overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k} \right]$: Difusión molecular
$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right]$: Producción de esfuerzo
$G_{ij} = -\rho \beta [g_i \overline{u_j' \theta} + g_j \overline{u_i' \theta}]$: Producción de sustentación
$\phi_{ij} = p' \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right]$: Presión-Deformación
$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}$: Disipación
$F_{ij} = -2\rho \Omega_k [\overline{u_j' u_m'} \varepsilon_{ikm} + \overline{u_i' u_m'} \varepsilon_{jkm}]$: Producción por sistema rotatorio
S_{user}	: Terminó fuente, definido por usuario

Para la resolución de la ecuación (9) se requiere modelación para los términos de difusión turbulenta, presión-deformación y disipación, para el resto de términos no se necesita.

2.4. Características multifase del flujo.

En el flujo multifase, una fase puede ser definida como un tipo de material identificable que tiene una respuesta inercial particular con el flujo y campo potencial en el que está inmerso. En el caso de un hidrociclón se encuentran distintas fases, entre ellas el agua, aire y partículas sólidas presentes en el flujo. Los enfoques principales de estudio de flujos multifase son:

- 1.- Enfoque Euleriano-Euleriano
- 2.- Enfoque Euleriano-Lagrangiano

Estos enfoques presentan diferencias particulares, lo que tiene como consecuencia que algunos sean más útiles que otros dependiendo del caso de estudio, ya sea entregando mejores resultados o disminuyendo el costo computacional.

2.4.1. Enfoque Euleriano-Euleriano.

Las fases son tratadas matemáticamente como continuos impenetrables. Esto debido a que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras. Aquí se introduce el concepto de fracción volumétrica de fase, la cual es continua en el espacio y tiempo, y la suma de estas es igual a uno. El código comercial FLUENT provee tres diferentes modelos: Volume of Fluid (VOF), Modelo de mezcla, y el modelo Euleriano.

2.4.1.1. Modelo Euleriano.

El modelo multifásicoeuleriano permite el modelado de múltiples fases, tal que la cantidad de fases secundarias solo está limitada por los requisitos de memoria y convergencia. Este modelo resuelve un set de ecuaciones para cada fase, considerando que estas son continuos interpenetrativos y que espacialmente estas comparten una misma presión. Por otra parte, las propiedades de fases granulares son descritas utilizando la teoría cinética granular. El modelo define el volumen de la fase $q^{\text{ésima}}$ utilizando la ecuación (10).

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (10)$$

Donde α_q corresponde a la fracción volumétrica. Por otra parte, en la ecuación (11) y (12) se presentan la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación de momentum respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q v_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q v_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q g \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (v_p - v_q) + \dot{m}_{pq} v_{pq} - \dot{m}_{qp} v_{qp}) \end{aligned} \quad (12)$$

Del cual $\bar{\tau}_q$ corresponde al tensor esfuerzo-deformación y queda definido de acuerdo a la ecuación (13).

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla v_q + \nabla v_q^T) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot v_q \bar{I} \quad (13)$$

Donde

- μ_q : Viscosidad de corte de la fase
- λ_q : Terminos viscosidad de cuerpo de la fase
- v_{pq} : Velocidad de la interfase
- K_{pq} : Coeficiente de intercambio de momentum

Cuando la interacción es fluido-fluido, el coeficiente de intercambio de momentum se define de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$K_{pq} = \frac{\rho_q f}{6\tau_q} d_p A_i \quad (14)$$

Tal que

$$\tau_q = \frac{\rho_q d_p^2}{18\mu_q} \quad (15)$$

$$f = \left(a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \right) \quad (16)$$

Donde

- A_i : Área interfacial
- d_p : Diámetro de las burbujas
- f : Función de arrastre
- τ_q : Tiempo de relajación de las partículas

Para una interacción es fluido-sólido, el coeficiente de intercambio de momentum se define de acuerdo a la fracción volumétrica, si esta es mayor a 0,8 se tienen las ecuaciones (17) y (18).

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |v_s - v_l|}{d_s} \alpha_l \cdot 2.6 \quad (17)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l \cdot Re_s} (1 + 0.15(\alpha_l Re_s)^{0.687}) \quad (18)$$

Cuando la fracción volumétrica de líquido es menor o igual a 0,8 se tiene la ecuación (19).

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s(1 - \alpha_l)\mu}{\alpha d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_l \alpha_s |v_s - v_l|}{d_s} \quad (19)$$



CAPITULO 3

Impacto de la distribución granulométrica

3.1. Modelo computacional

3.1.1. Geometría de hidrociclón de estudio.

En la Figura 8 se presenta la geometría del hidrociclón de laboratorio.

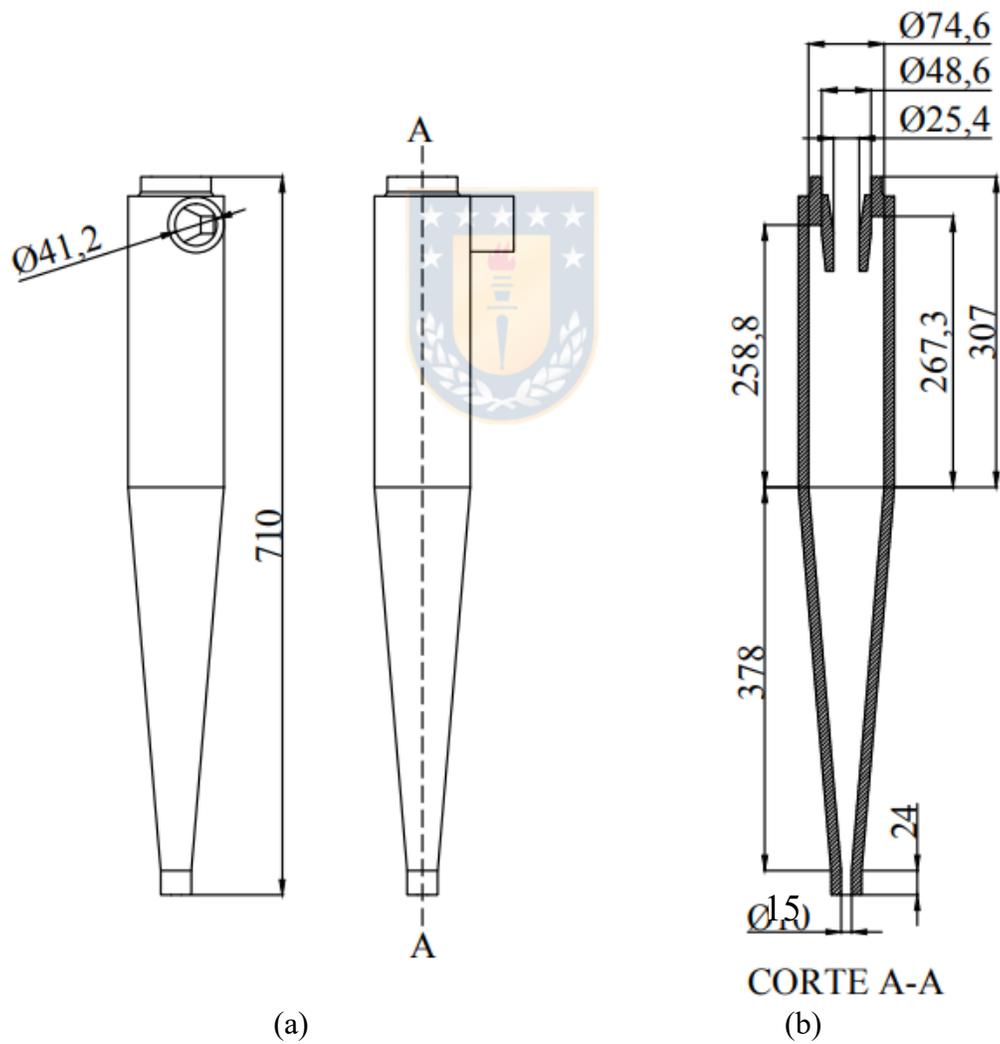


Figura 8. Geometría hidrociclón en milímetros, (a) vista frontal y lateral, (b) vista en corte.

3.1.2. Volumen de control y discretización.

En el volumen de control se considera el hidrociclón, una tubería de alimentación de 41,2 [mm] de diámetro, una tubería de descarga del overflow de 35,6 [mm] de diámetro, y además un volumen atmosférico cilíndrico de 250 [mm] de diámetro y 75 [mm] de altura. Este volumen de atmósfera se ubica justo después del ápex del hidrociclón para poder analizar el tipo de descarga *underflow*.

Para simplificar la discretización del dominio se modifica la sección de alimentación del hidrociclón, cambiando la entrada original circular por una cuadrada conservando el área transversal. Este cambio es útil para poder mantener una distribución homogénea de elementos en el mallado del hidrociclón.

La confección de la grilla computacional se realizó con elementos hexaédricos, refinados en zonas de importancia como por ejemplo el ápex, vortex, y en la unión atmósfera-ápex para asegurar una convergencia del modelo. En la Figura 9 se presenta la grilla computacional y en la Tabla 1 se muestran sus respectivas características.

Tabla 2. Características de grilla.

Característica	Valor
Cantidad de elementos	233.240
Calidad de elementos (EquiSizeSkew)	0 - 0,74
Razón de aspecto máxima	40,59

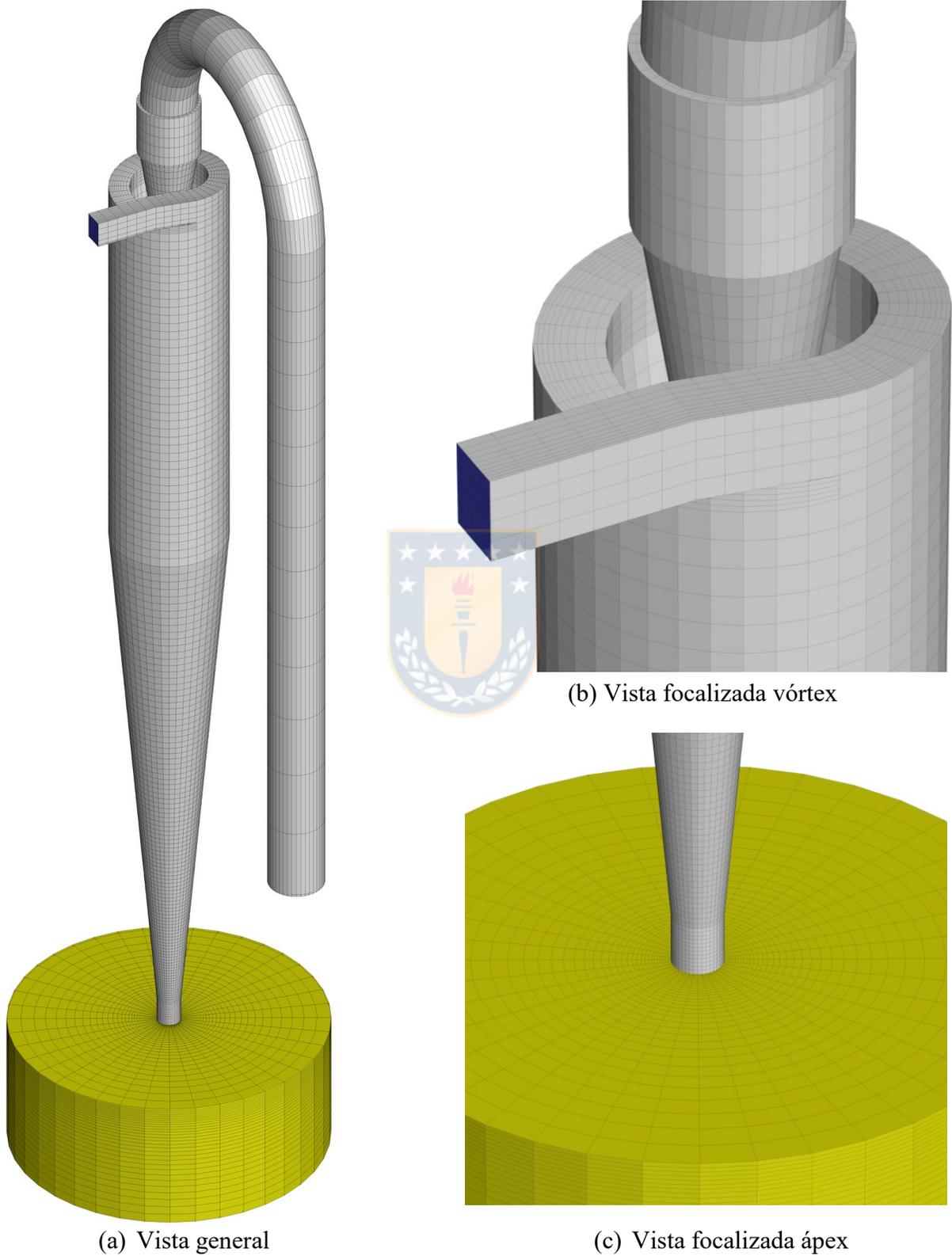
3.1.3. Condiciones de borde.

En la sección de alimentación del hidrociclón se considera una condición de borde de “*velocity inlet*”, mientras que la sección de salida del *overflow* se considera como “*pressure outlet*”. Por otra parte, en la sección atmosférica considerada en el volumen de control se tienen dos condiciones de borde, la primera consiste en “*symmetry*” para la superficie superior y el manto, mientras que para la superficie inferior se considera la condición de “*pressure outlet*”. Las paredes del sistema que encierran el flujo son consideradas como “*wall*”. En la Figura 10 se muestran dichas condiciones.

3.1.4. Multifase y turbulencia

Para describir el agua, aire y fases granulares se selecciona el Modelo MultifaseEuleriano. Respecto a las fases granulares, se utilizarán varios promedios por tramos para describir una granulometría completa.

El modelo de turbulencia considerado para todas las simulaciones corresponde al *Reynolds Stress Model* (RSM) descrito en el capítulo 2.



(a) Vista general

(b) Vista focalizada vórtex

(c) Vista focalizada ápex

Figura 9. Discretización dominio computacional.

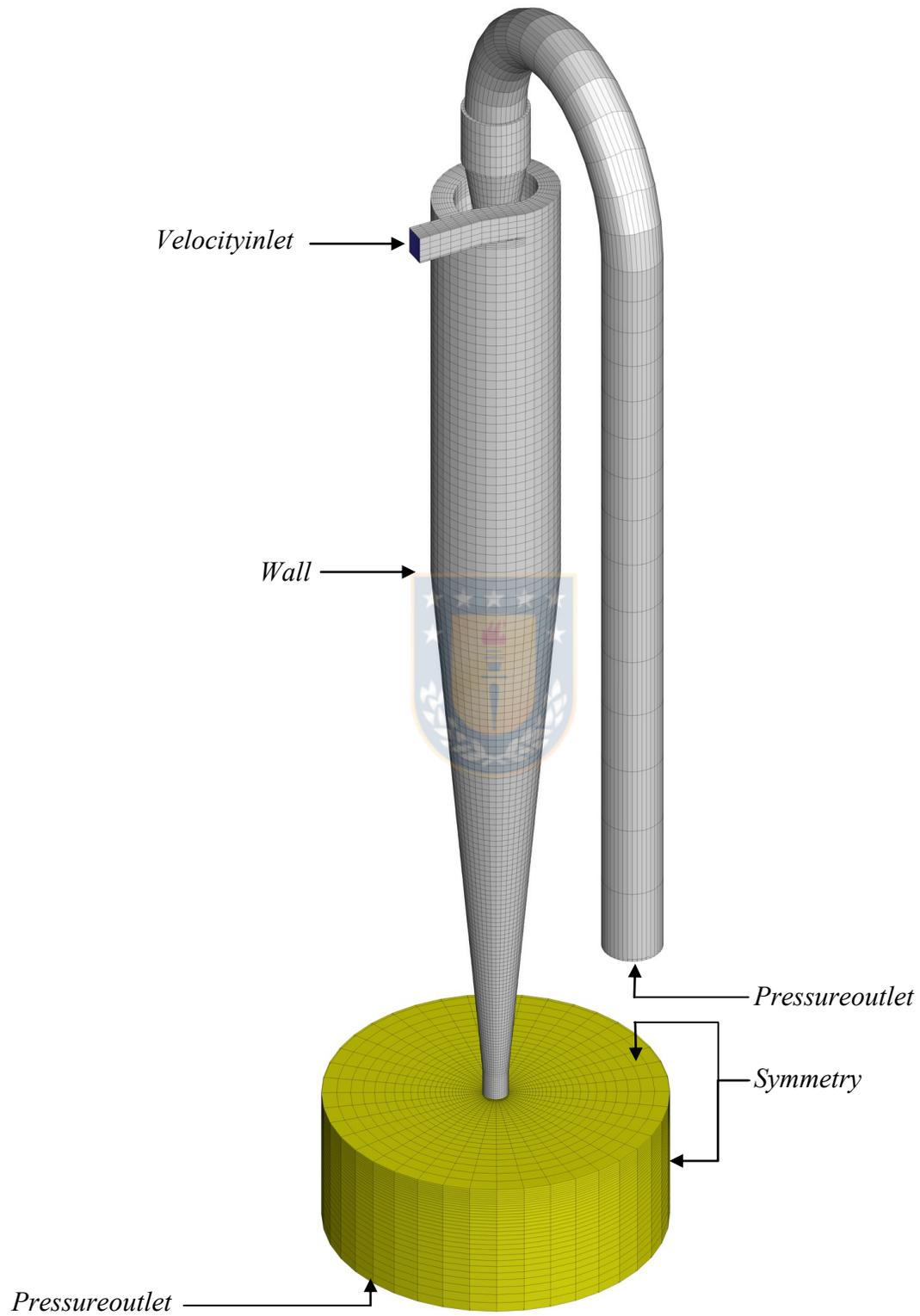


Figura 10. Condiciones de borde.

3.1.5. Descripción de casos a simular.

Se tiene 6 distintos casos de trabajo, en los cuales se hace variar la granulometría con la que se realiza el ensayo y la presión de alimentación. En la Tabla 5 se muestra un cuadro resumen.

Tabla 5. Cuadro resumen condiciones de entrada a modelo.

Caso 1	Caso 4
<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 1 ($d_{50} = 27,4$ [μm]). - Presión alimentación: 0,5 [bar]. - Velocidad alimentación: 6,23 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275. 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 2 ($d_{50} = 40,5$ [μm]). - Presión alimentación: 0,5 [bar]. - Velocidad alimentación: 6,16 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275.
Caso 2	Caso 5
<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 1 ($d_{50} = 27,4$ [μm]). - Presión alimentación: 1,0 [bar]. - Velocidad alimentación: 7,99 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275. 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 2 ($d_{50} = 40,5$ [μm]). - Presión alimentación: 1,0 [bar]. - Velocidad alimentación: 7,61 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275.
Caso 3	Caso 6
<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 1 ($d_{50} = 27,4$ [μm]). - Presión alimentación: 1,5 [bar]. - Velocidad alimentación: 9,74 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275. 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría 2 ($d_{50} = 40,5$ [μm]). - Presión alimentación: 1,5 [bar]. - Velocidad alimentación: 9,75 [m/s]. - Fracción sólida en volumen: 0,2275.

Para el ensayo de laboratorio se dispone de 2 materiales granulares distintos, CP-3000 y AG-200. La primera granulometría de ensayo corresponde al CP-3000, mientras que la segunda granulometría corresponde a una mezcla compuesta por 50% de CP-3000 y 50% de AG-200. En la Figura 11 se muestra la granulometría de cada material mencionado y la mezcla resultante. Debido al costo computacional implicado al describir una granulometría completa en el modelo, es que estas se dividen en 5 tramos, donde cada tramo corresponde a un 20% de la masa total, y se obtiene un diámetro promedio por tramo. En la Figura 12 se muestra la granulometría 1 y 2 de forma experimental y numérica.

Cabe destacar, que la relación entre el *ápex* y el *vortexfinder* para la geometría de estudio corresponde a 0,6 aproximadamente, por lo que, de a la literatura [Bustamante, 1991; Concha *et al.*, 1996], el *underflow* para todas las condiciones de operación deben ser tipo *spray*.

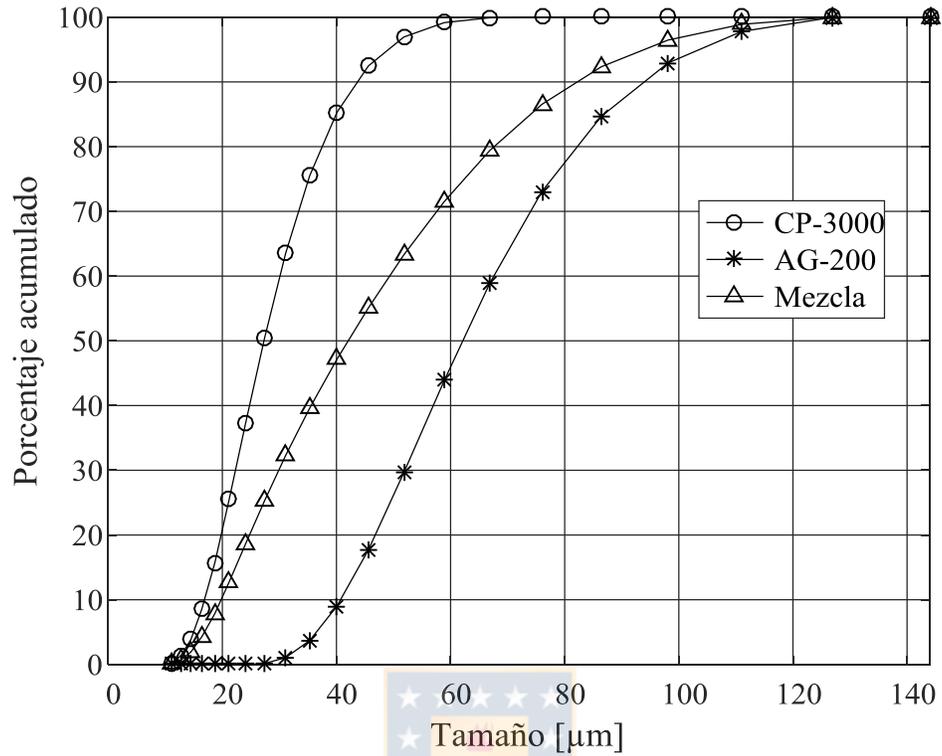


Figura 11. Granulometrías materiales y mezcla.

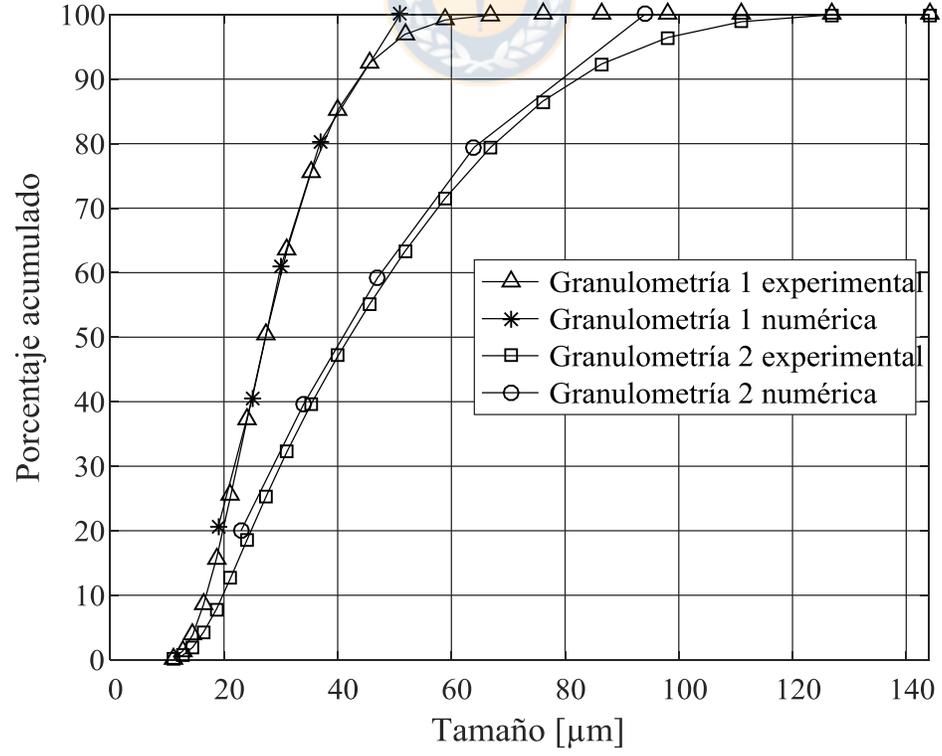


Figura 12. Granulometría 1 y 2, experimental y numérica.

3.2. Resultados

3.2.1. Cálculo y medición de flujos

La simulación se realiza en régimen transiente, donde se calcula el flujo de agua y de fases granulares en las descargas del hidrociclón. En la Figura 13 se muestra la medición de flujos para el primer caso.

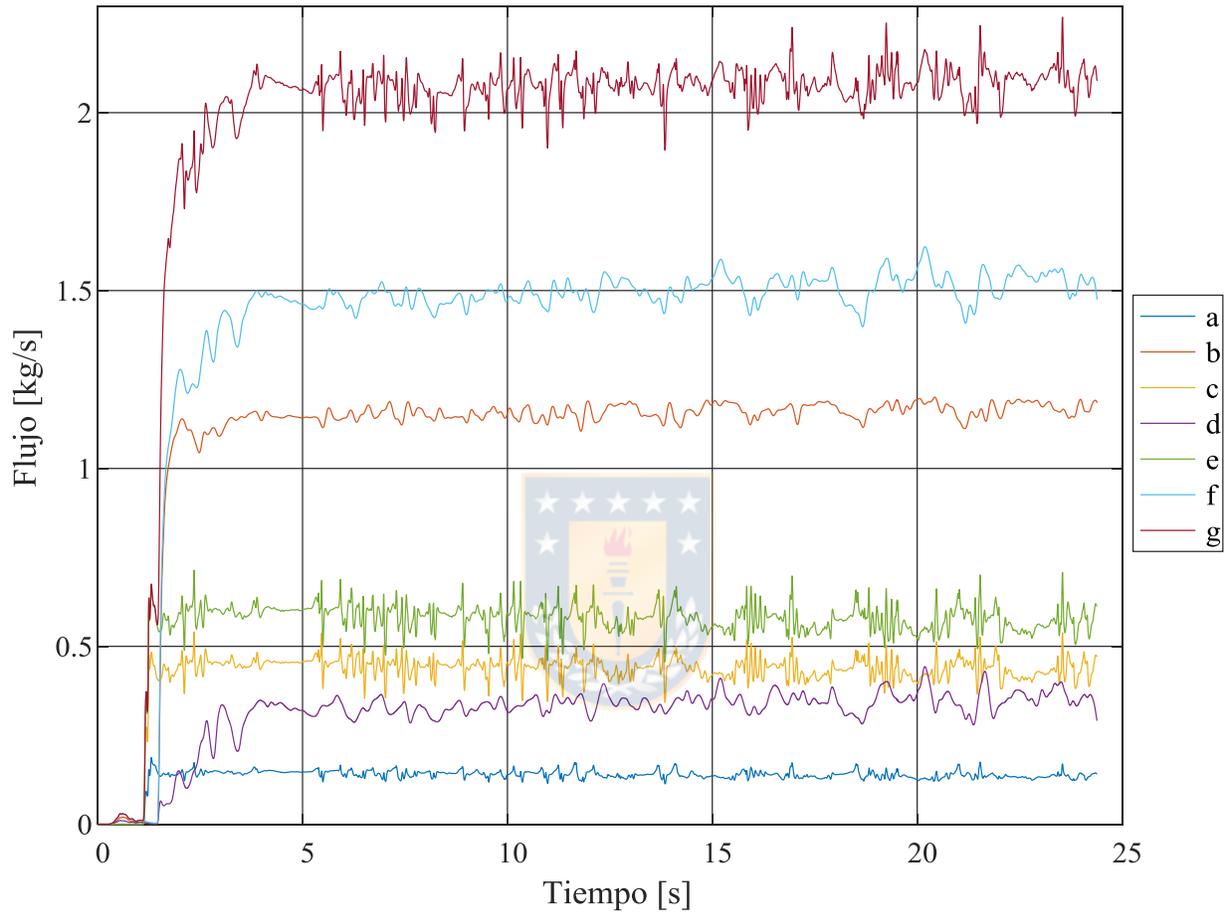


Figura 13. Flujos máxicos en descargas del hidrociclón para el primer caso. Donde (a): flujo agua *underflow*, (b): flujo agua *overflow*, (c): flujo sólido *underflow*, (d): flujo sólido *overflow*, (e): flujo total *underflow*, (f) flujo total *overflow*, (g) flujo total descargado.

Se puede observar que el hidrociclón alcanza una cierta estabilidad aproximadamente a los 5 [s] de cálculo, luego los datos utilizados para la obtención de resultados se realizan desde ese instante en adelante. Cabe destacar que este comportamiento se repite en todos los casos. A partir de estas mediciones, se obtiene un flujo promedio y la desviación estándar del mismo, para poder ser comparado con la medición experimental realizada.

En la Tabla 6 se presenta la medición experimental de los flujos, además el promedio y desviación estándar obtenidos del modelo computacional, donde la primera y segunda columna corresponde al flujo de agua en el *underflow* y *overflow* respectivamente, la tercera y cuarta corresponden al flujo de sólido de las mismas descargas, mientras que la quinta y sexta columna corresponde al flujo total

underflow y flujo total *overflow* de forma respectiva. Por otra parte, en la Tabla 7 se muestra las fracciones volumétricas obtenidas de forma experimental y del modelo numérico para todos los casos.

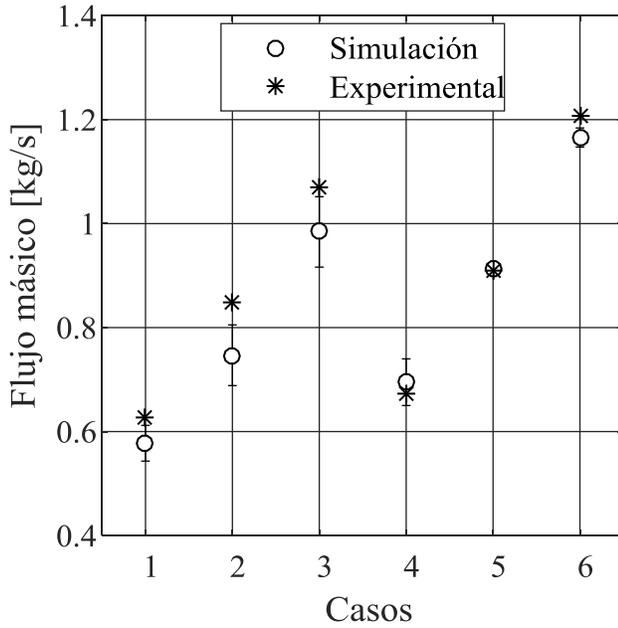
Tabla 6. Medición de flujos. Donde (a): medición experimental, (b): promedio simulación, (c): desviación estándar simulación.

Caso	Tipo	$\dot{m}_{w,u}$ [kg/s]	$\dot{m}_{w,o}$ [kg/s]	$\dot{m}_{s,u}$ [kg/s]	$\dot{m}_{w,o}$ [kg/s]	\dot{m}_u [kg/s]	\dot{m}_o [kg/s]
1	a	0,154	0,906	0,472	0,316	0,626	1,222
	b	0,139	1,160	0,438	0,342	0,578	1,502
	c	0,010	0,020	0,027	0,028	0,034	0,039
2	a	0,179	1,180	0,670	0,340	0,850	1,520
	b	0,164	1,510	0,583	0,410	0,747	1,920
	c	0,013	0,038	0,047	0,069	0,058	0,092
3	a	0,220	1,437	0,849	0,383	1,069	1,821
	b	0,202	1,465	0,782	0,432	0,984	1,898
	c	0,012	0,108	0,058	0,171	0,068	0,097
4	a	0,140	0,907	0,533	0,246	0,673	1,153
	b	0,161	0,975	0,534	0,243	0,695	1,217
	c	0,013	0,043	0,037	0,072	0,045	0,068
5	a	0,177	1,116	0,732	0,229	0,909	1,345
	b	0,186	1,122	0,728	0,196	0,914	1,318
	c	0,004	0,016	0,008	0,037	0,009	0,025
6	a	0,229	1,430	0,977	0,256	1,206	1,686
	b	0,228	1,481	0,937	0,213	1,166	1,694
	c	0,006	0,044	0,016	0,067	0,018	0,072

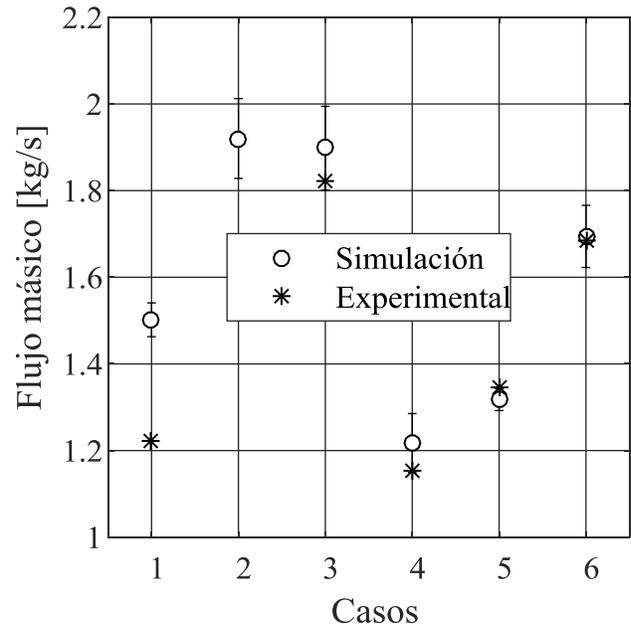
Tabla 7. Fracciones volumétricas de sólido en las descargas. Donde (a): valor *underflow* experimental, (b) valor promedio *underflow* modelo, (c) desviación estándar *underflow* modelo, (d): valor *underflow* experimental, (e) valor promedio *underflow* modelo, (f) desviación estándar *underflow* modelo.

Valor	1	2	3	4	5	6
a	0,549	0,597	0,605	0,601	0,620	0,629
b	0,557	0,587	0,607	0,571	0,610	0,621
c	0,013	0,012	0,011	0,016	0,005	0,006
d	0,121	0,103	0,096	0,097	0,075	0,066
e	0,105	0,098	0,106	0,090	0,065	0,054
f	0,007	0,014	0,043	0,026	0,012	0,016

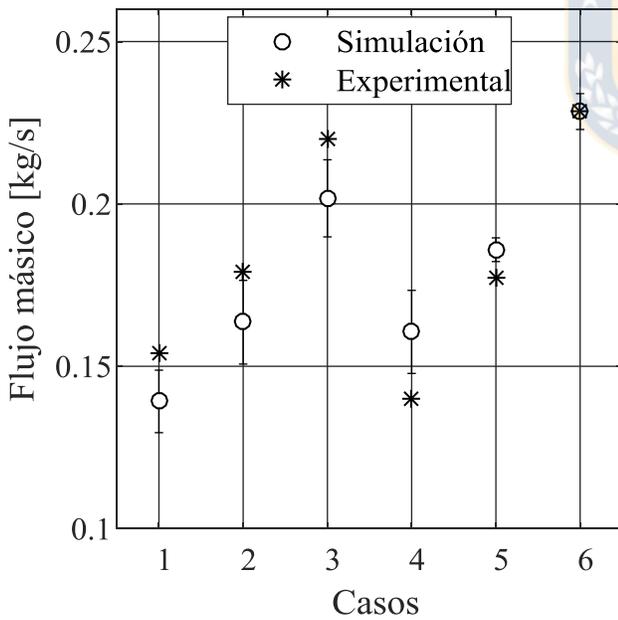
En la Figura 14 se presenta el flujo másico en las descargas *underflow* y *overflow* de forma gráfica. Por otra parte, en la Figura 15 y Figura 16 se muestra el flujo másico de agua y sólidos en la descarga *underflow* y *overflow* respectivamente.



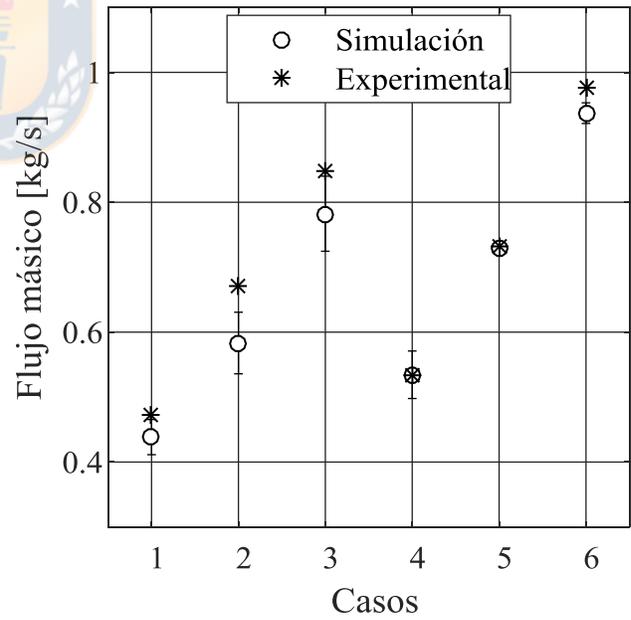
(a) Underflow.



(b) Overflow.

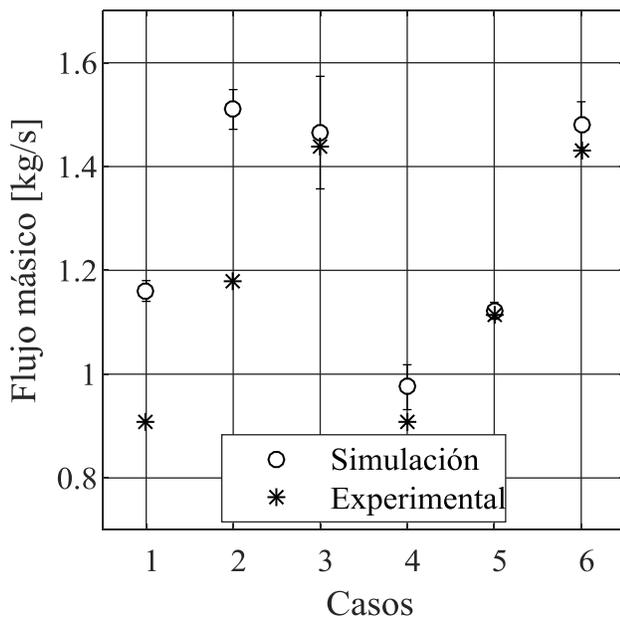
Figura 14. Flujo másico descarga *underflowy overflow*.

(a) Flujo de agua.

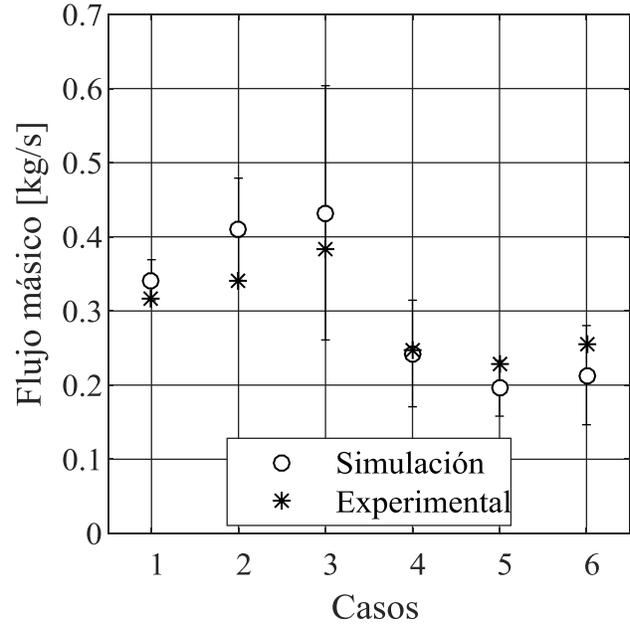


(b) Flujo de sólidos.

Figura 15. Flujo másico de agua y sólidos en la descarga *underflow*



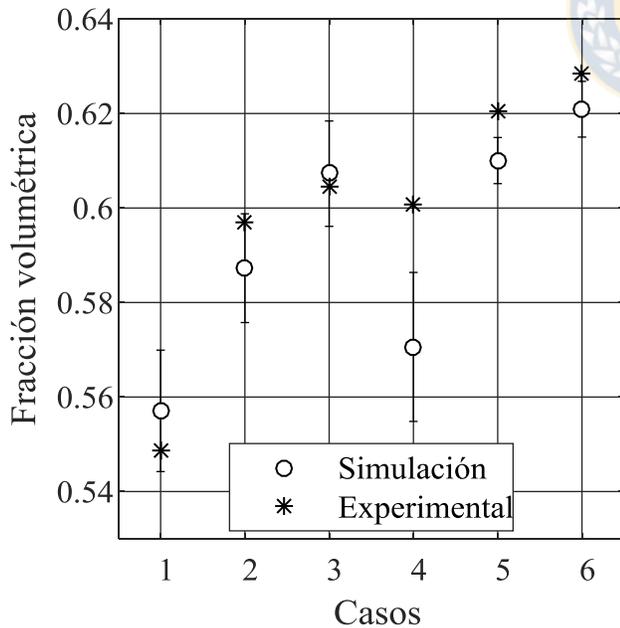
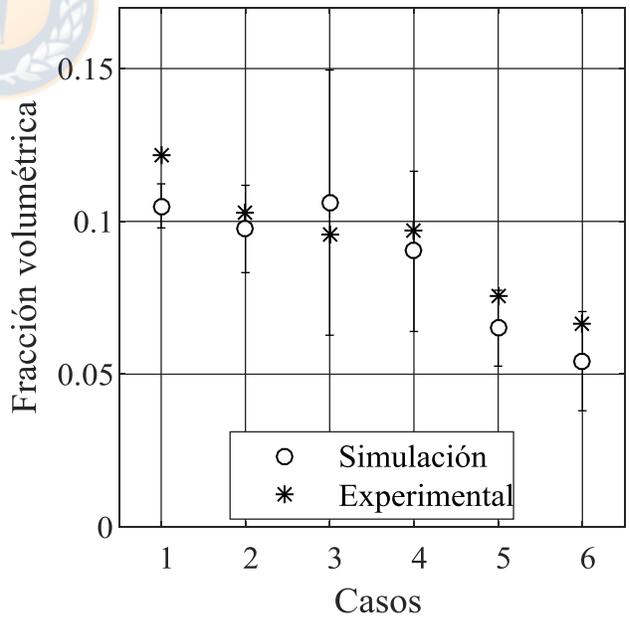
(a) Flujo de agua.



(b) Flujo de sólidos

Figura 16. Flujo másico de agua y sólidos en la descarga *overflow*.

En la Figura 17 se presenta la fracción volumétrica de sólidos para las descargas *underflow* y *overflow*.

(a) Fracción volumétrica *underflow*.(b) Fracción volumétrica *overflow*.**Figura 17.** Fracción volumétrica de sólidos para las descargas *underflow* y *overflow*.

Para observar la dispersión de los datos obtenidos a partir del modelo numérico, en la Tabla 8 se muestra la desviación estándar sobre el promedio de: (a) flujo másico agua *underflow*, (b) flujo agua másico *overflow*, (c) flujo másico sólido *underflow*, (d) flujo másico sólido *overflow*, (e) flujo másico total *underflow*, (f) flujo másico total *overflow*, (g) fracción volumétrica de sólidos en el *underflow*, y (h) fracción volumétrica de sólidos en el *overflow*. Por otra parte, en la Tabla 9 se muestra la variación del promedio de los resultados respecto al valor experimental medido.

Tabla 8. Desviación estándar sobre la media.

Caso	a	b	c	d	e	f	g	h
1	6,9%	1,7%	6,2%	8,1%	6,0%	2,1%	2,3%	6,9%
2	7,9%	2,5%	8,1%	16,8%	7,8%	4,8%	2,0%	14,6%
3	5,9%	7,4%	7,4%	39,7%	6,9%	5,1%	1,8%	40,9%
4	8,0%	4,4%	6,8%	29,6%	6,5%	5,6%	2,8%	29,0%
5	2,0%	1,5%	1,1%	19,2%	1,0%	1,9%	0,8%	19,1%
6	2,4%	3,0%	1,7%	31,3%	1,6%	4,2%	1,0%	29,9%

Tabla 9. Variación promedio numérico respecto valor experimental.

Caso	a	b	c	d	e	f	g	h
1	9,5%	28,0%	7,2%	8,1%	7,7%	22,9%	1,5%	13,4%
2	8,8%	28,0%	13,0%	20,5%	12,1%	26,3%	1,6%	4,9%
3	8,2%	2,0%	7,8%	12,8%	7,9%	4,2%	0,4%	11,1%
4	14,5%	7,5%	0,3%	1,3%	3,2%	5,6%	5,0%	7,0%
5	4,8%	0,6%	0,5%	14,8%	0,5%	2,0%	1,7%	13,6%
6	0,1%	3,6%	4,1%	16,7%	3,3%	0,5%	1,2%	18,1%

3.2.2. Comportamiento del *underflow*.

A partir de contornos de fracción volumétrica se observa con facilidad y gran nivel de detalle el comportamiento interno del hidrociclón. En la Figura 18 se muestra la fracción volumétrica de aire de un corte transversal, donde se puede apreciar el núcleo de aire y el tipo de descarga *underflow* presente en cada caso. De forma análoga, en la Figura 19 se muestra la fracción volumétrica de sólido, donde se observa la distribución de sólidos dentro del hidrociclón. Por otra parte, de forma más particular, en la Figura 20 se muestra un acercamiento a la descarga *underflow* del cual se mide el ángulo de la misma, y es comparado con la Figura 21, la cual corresponde a fotografías del banco de ensayo para cada condición de operación.

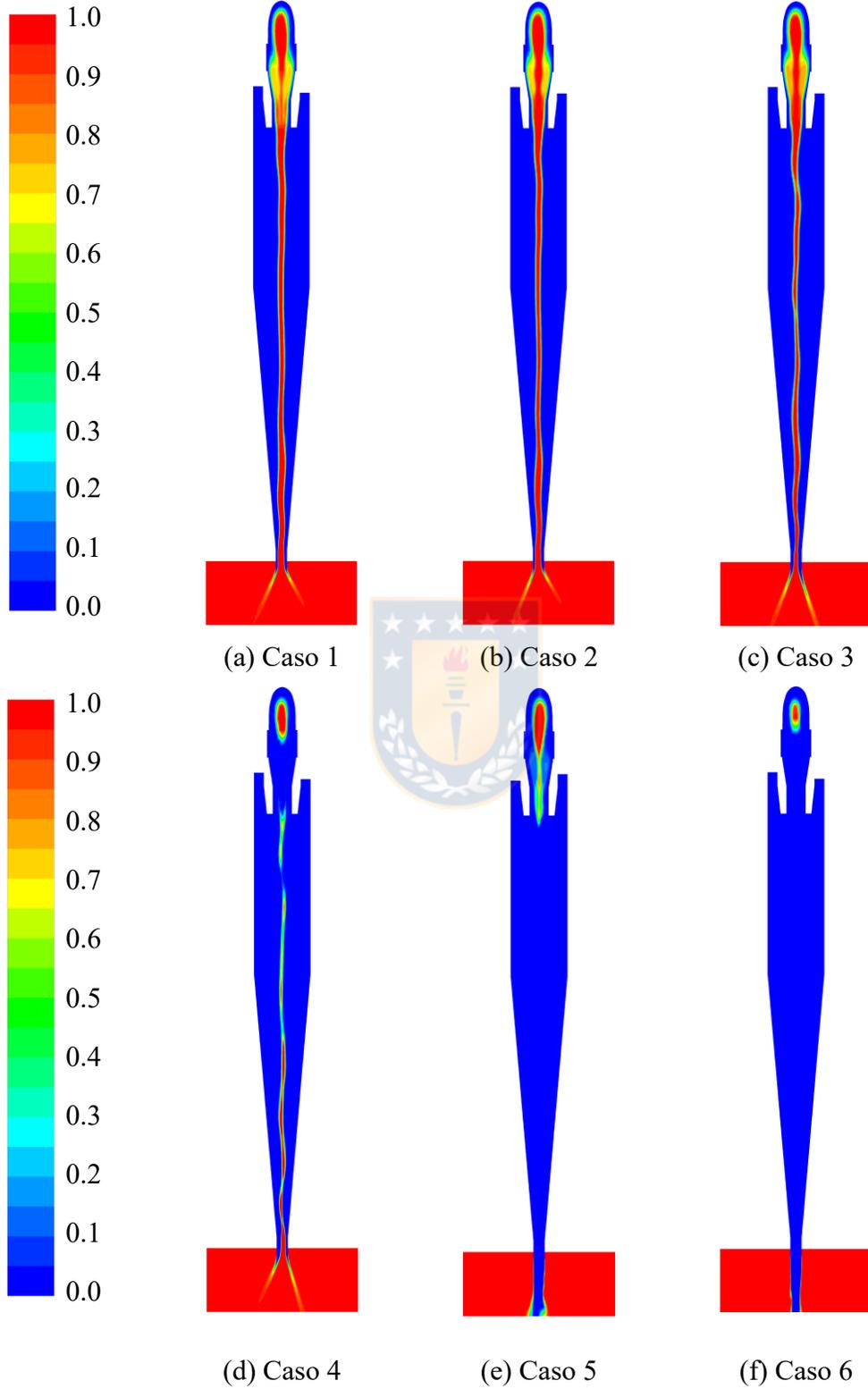


Figura 18. Fracción volumétrica de aire.

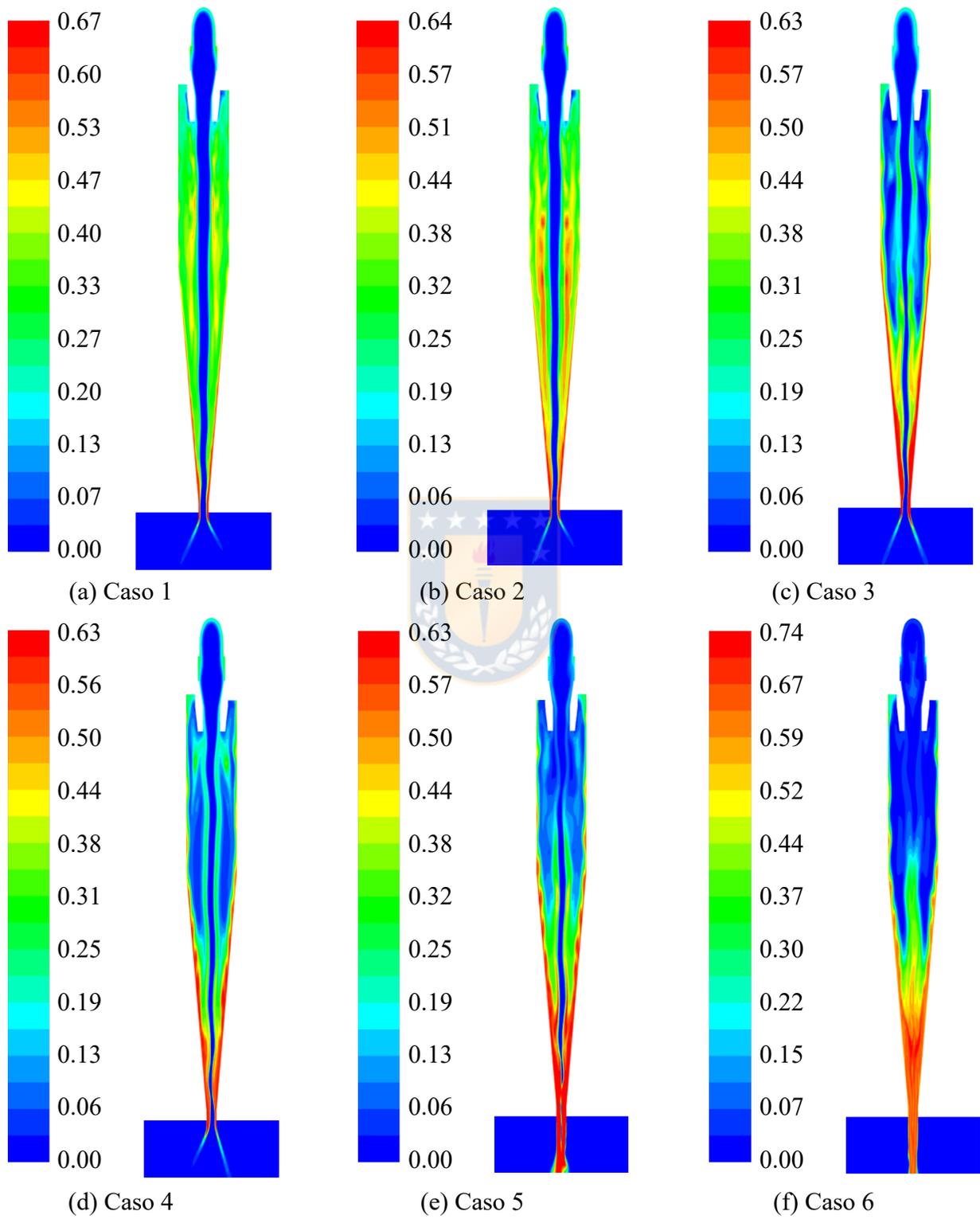


Figura 19. Fracción volumétrica sólida.

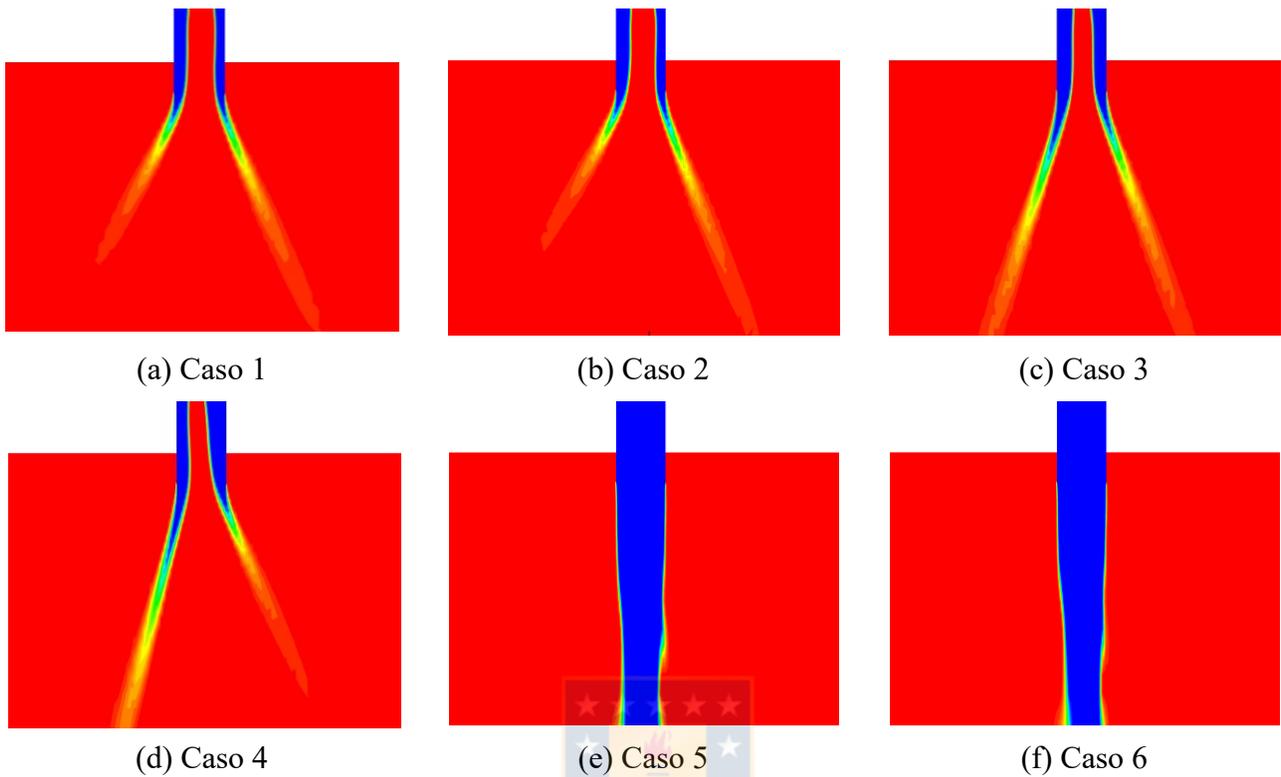


Figura 20. Acercamiento *underflow*.

En la Tabla 10 se muestra un cuadro resumen con el tipo de descarga y el ángulo de la misma, para cada condición de operación obtenido del modelo computacional y de forma experimental.

Tabla 10. Descripción *underflow*.

Caso	Modelo computacional		Resultado experimental	
	Tipo	Ángulo	Tipo	Ángulo
1	<i>spray</i>	43°	<i>spray</i>	39°
2	<i>spray</i>	40°	<i>spray</i>	35°
3	<i>spray</i>	34°	<i>spray</i>	31°
4	<i>spray</i>	32°	<i>spray</i>	28°
5	<i>roping</i>	0°	<i>roping</i>	0°
6	<i>roping</i>	0°	<i>roping</i>	0°

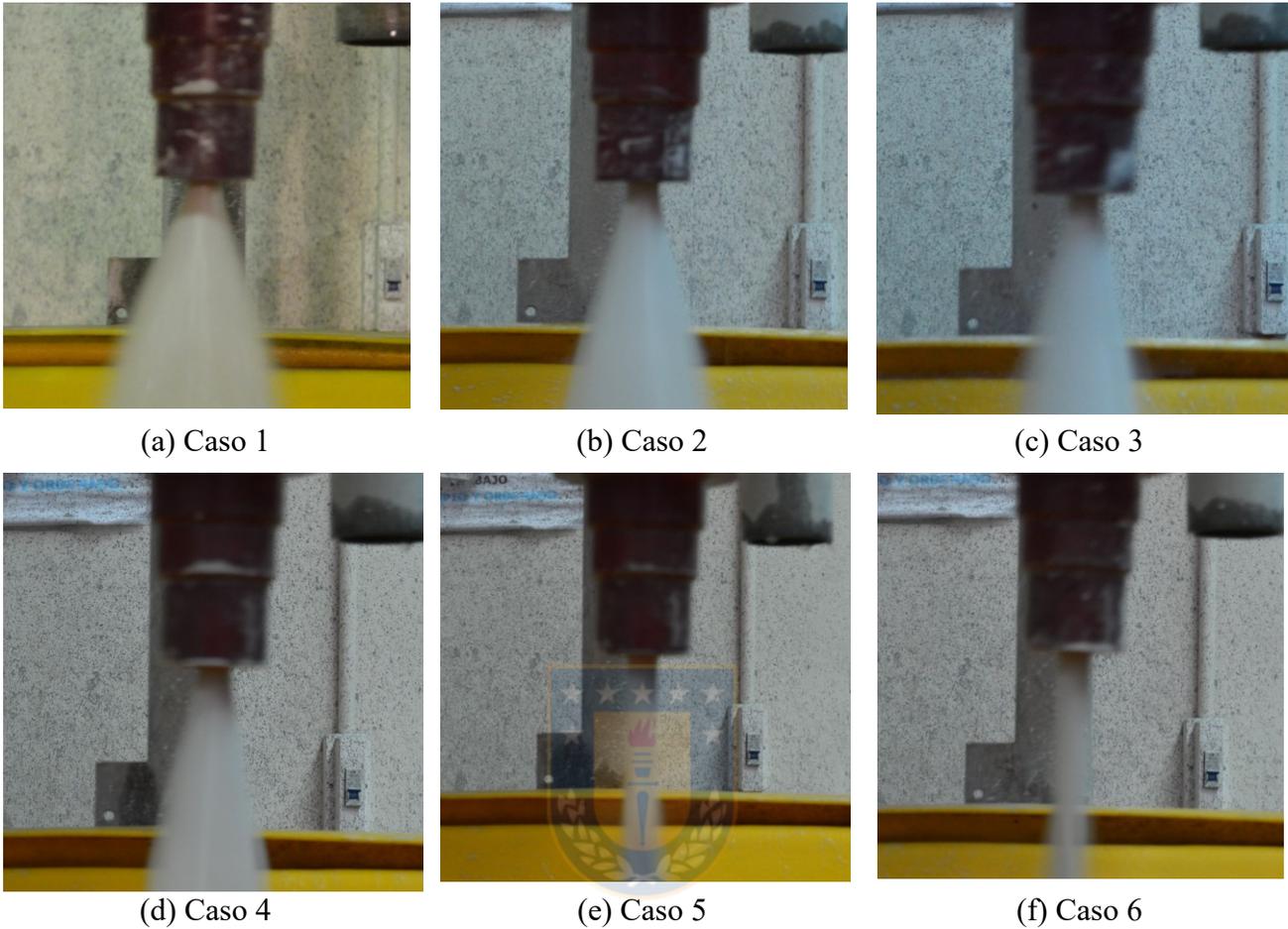


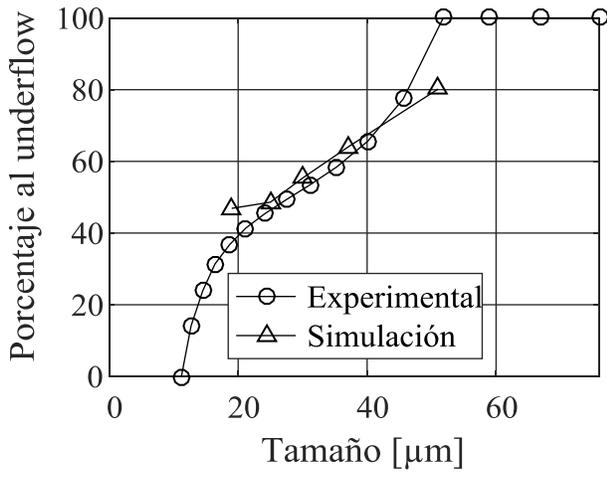
Figura 21. Descarga *underflow* experimental.

3.2.3. Selectividad.

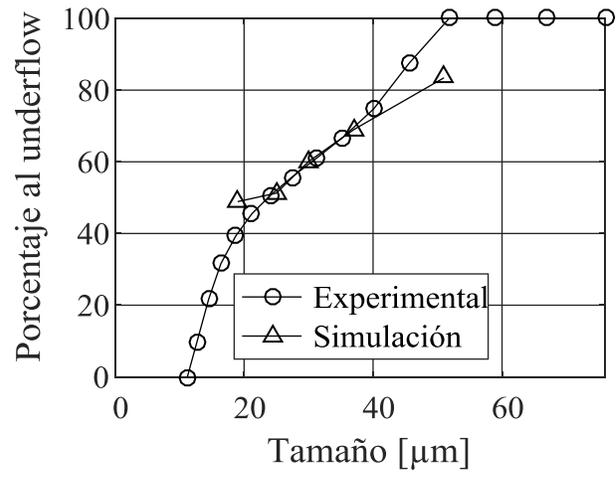
Se obtiene la curva de clasificación de forma experimental y numérica para cada condición de operación, estas se observan en la Figura 22. Luego la Figura 23 consiste en una comparación de las curvas experimentales y numéricas de los primeros tres casos. Por otra parte, en forma análoga, la Figura 24 corresponde a una comparación de las curvas experimentales y numéricas de los casos 4, 5 y 6. En la Tabla 11 se muestra el diámetro de corte obtenido de las curvas.

Tabla 11. Diámetro de corte.

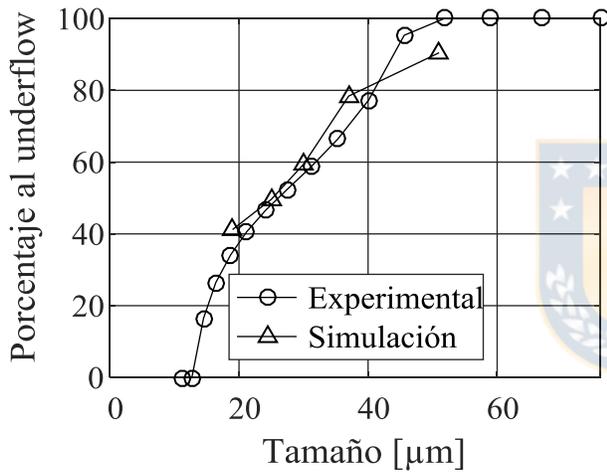
Caso	Modelo computacional	Experimental
1	26,0 [μm]	28,0 [μm]
2	21,5 [μm]	23,5 [μm]
3	25,0 [μm]	26,0 [μm]
4	23,0 [μm]	30,0 [μm]
5	30,5 [μm]	33,5 [μm]
6	29,5 [μm]	31,2 [μm]



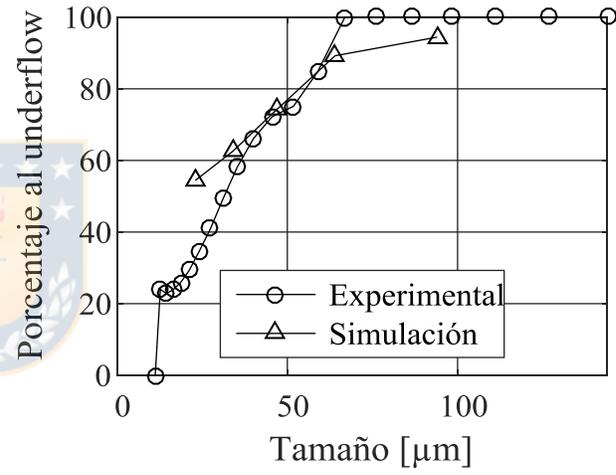
(a) Caso 1



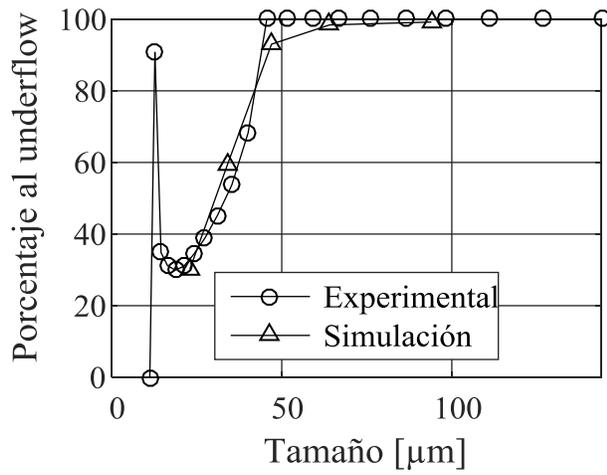
(b) Caso 2



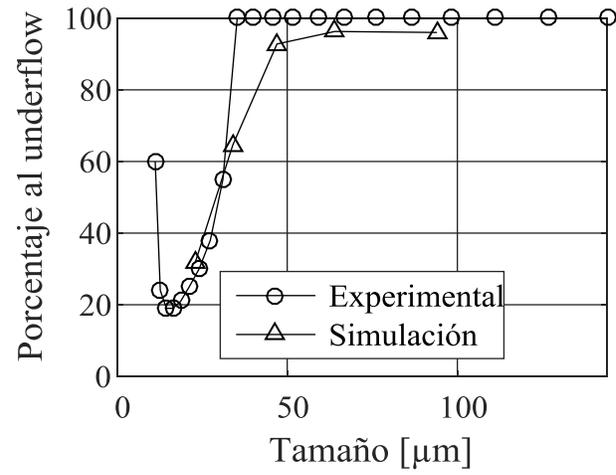
(c) Caso 3



(d) Caso 4



(e) Caso 5



(f) Caso 6

Figura 22. Curvas de clasificación experimental y numérica

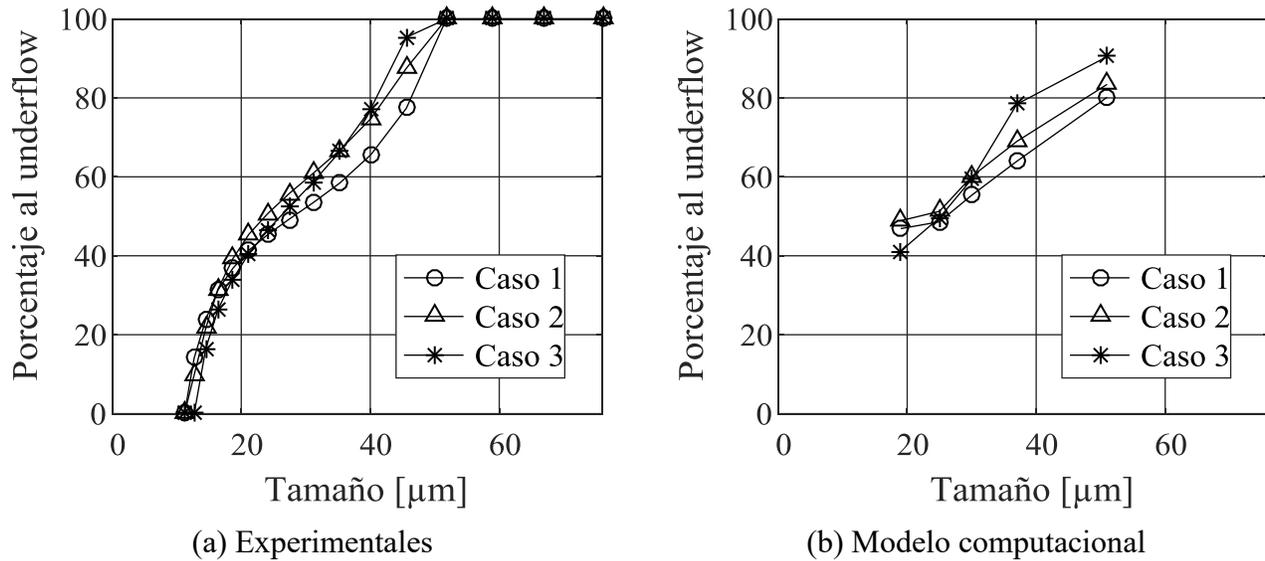


Figura 23. Curvas de clasificación casos 1, 2 y 3.

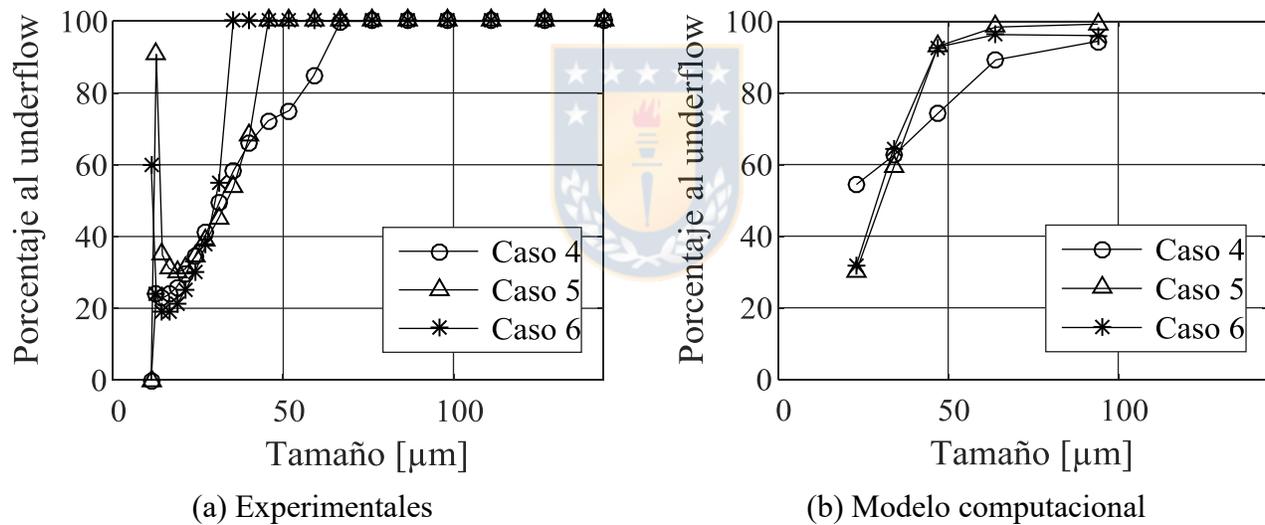
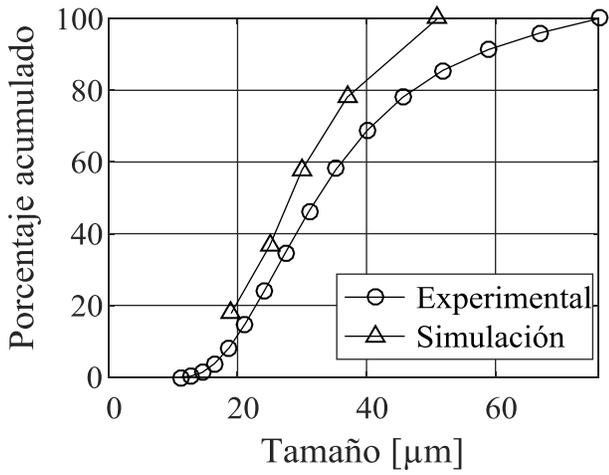


Figura 24. Curvas de clasificación casos 4, 5 y 6.

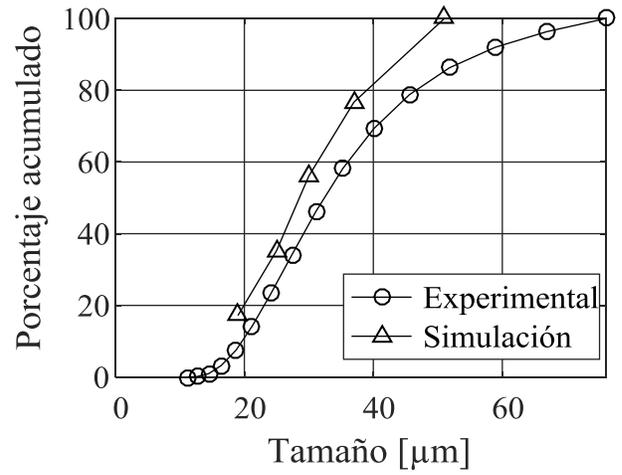
3.2.4. Granulometrías.

Se obtiene las granulometrías de la descarga *underflow* y *overflow* para cada caso, y se compara con la medición experimental realizada, estas se pueden observar en la Figura 25 y Figura 26 respectivamente.

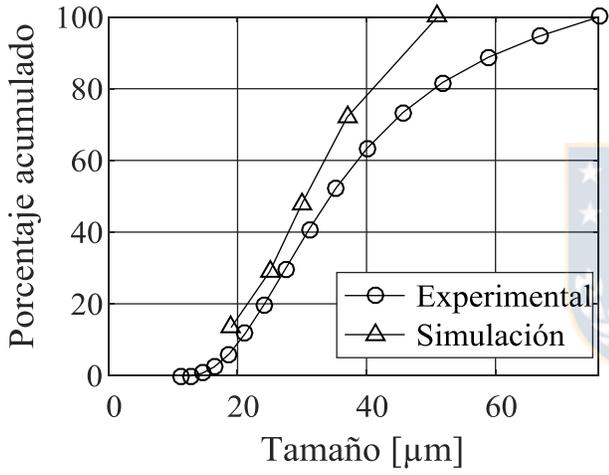
La Figura 27 corresponde a una comparación para los primeros tres casos, donde (a) se muestran las granulometrías experimentales para el *underflow*, (b) granulometrías del modelo computacional para el *underflow*, (c) granulometrías experimentales del *overflow* y (d) las numéricas del mismo. Por otro lado, la Figura 28 es análoga a la Figura 27 pero esta vez haciendo referencia a los casos 4, 5 y 6.



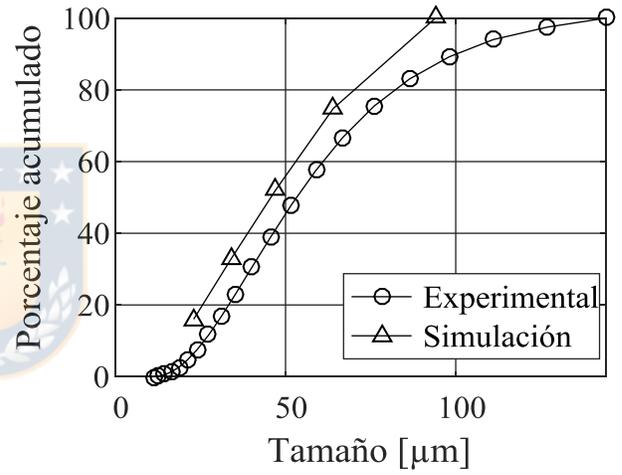
(a) Caso 1



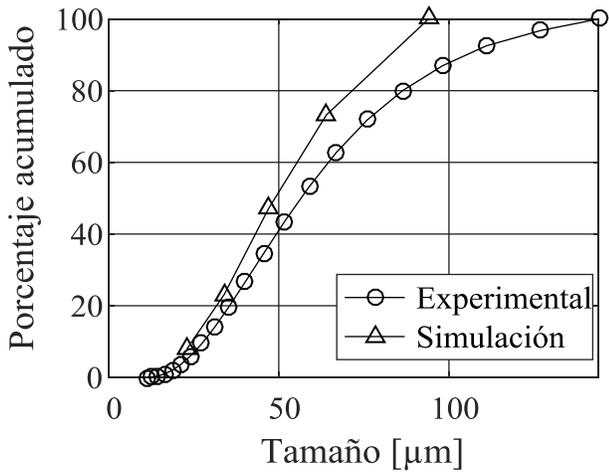
(b) Caso 2



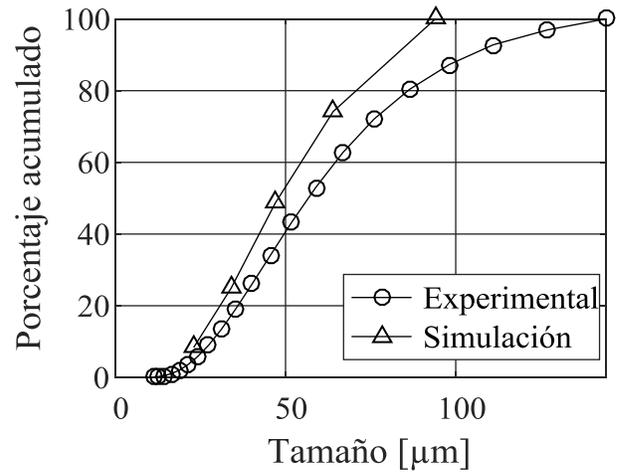
(c) Caso 3



(d) Caso 4

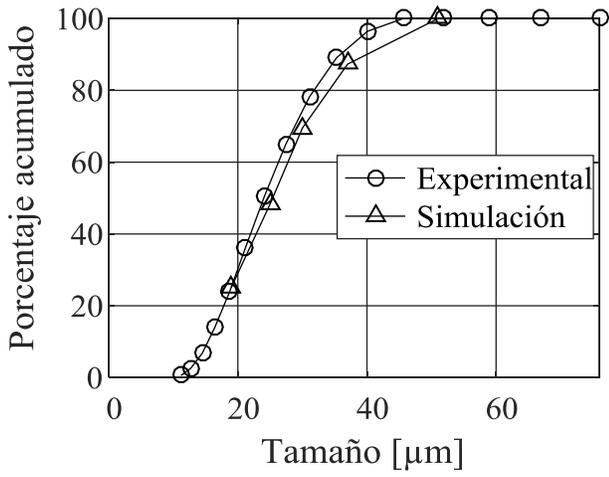


(e) Caso 5

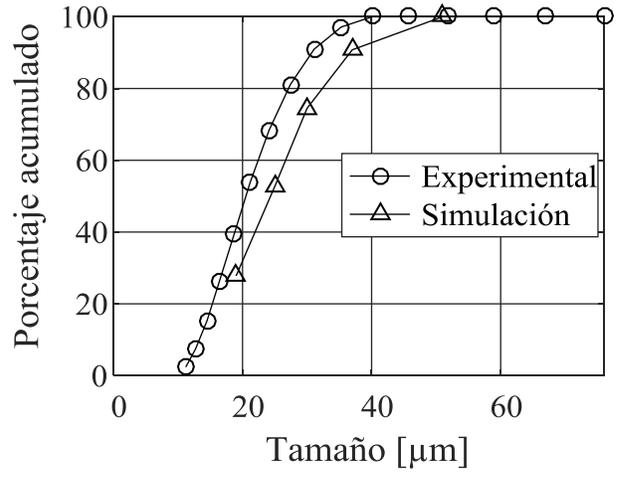


(f) Caso 6

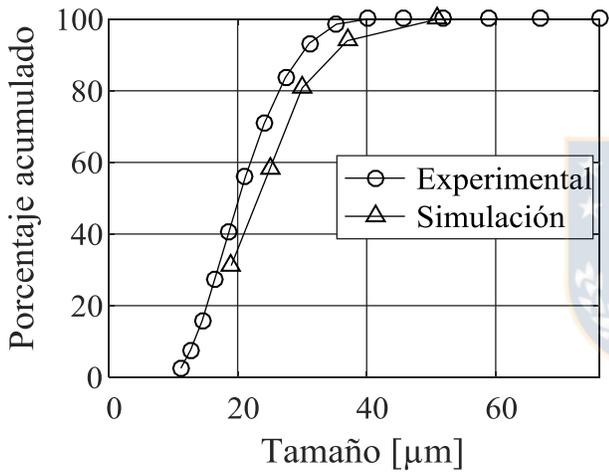
Figura 25. Granulometría descarga *underflow*.



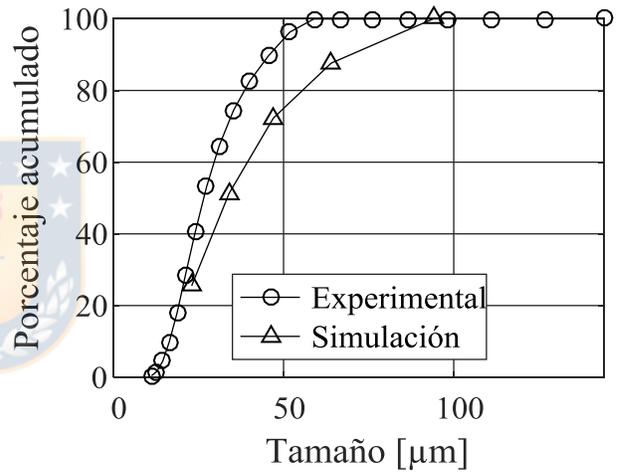
(a) Caso 1



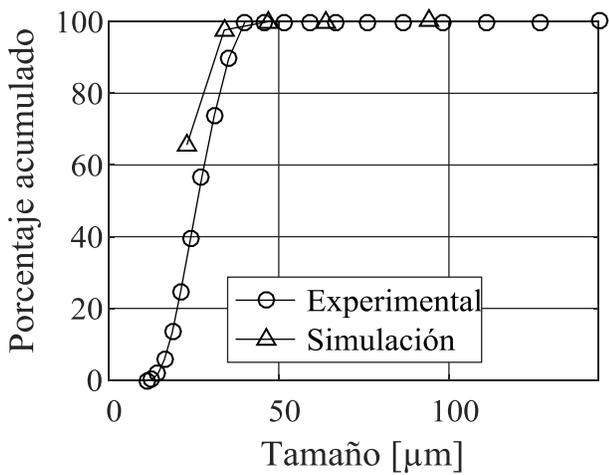
(b) Caso 2



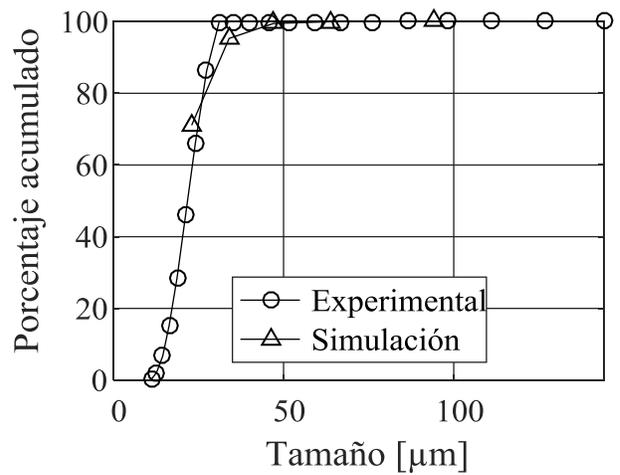
(c) Caso 3



(d) Caso 4

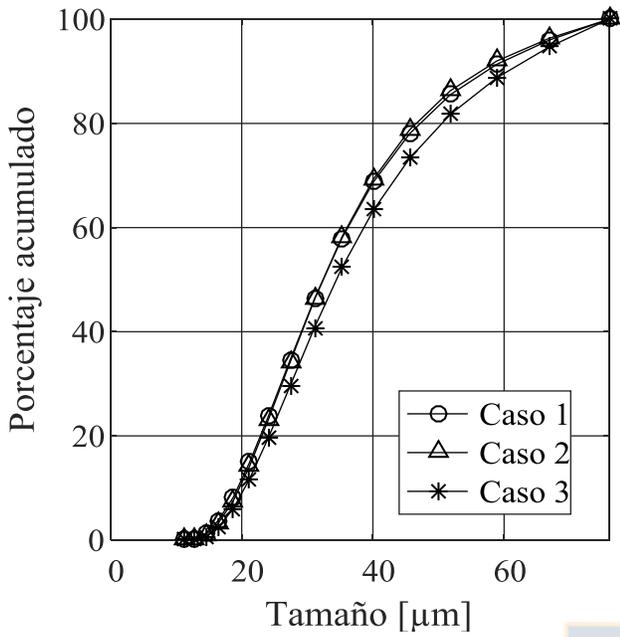


(e) Caso 5

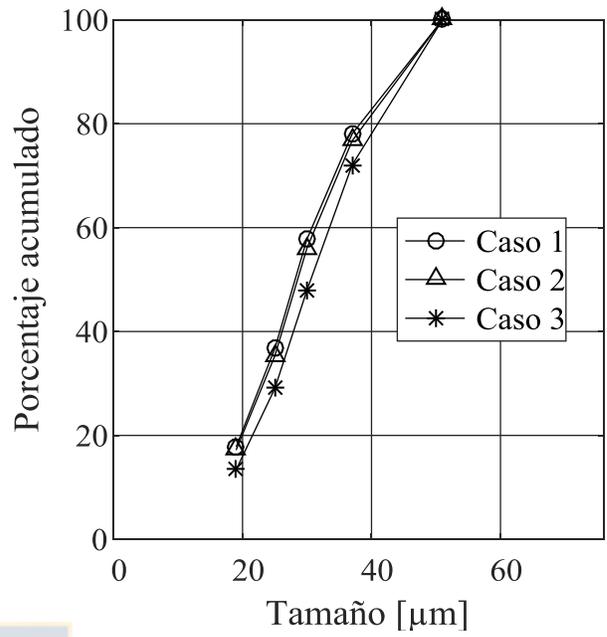


(f) Caso 6

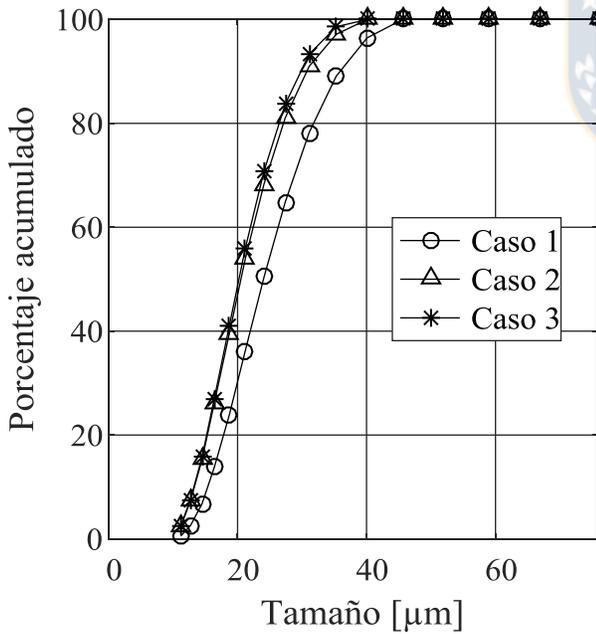
Figura 26. Granulometría descarga *overflow*.



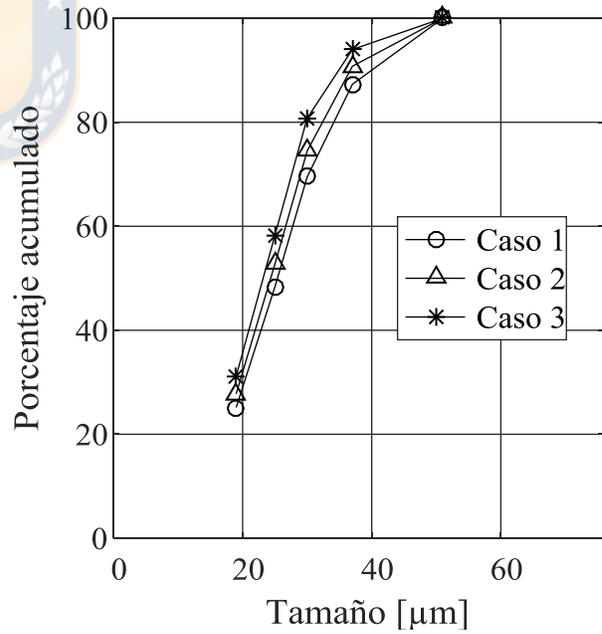
(a) Underflow experimental.



(b) Underflow numerico.

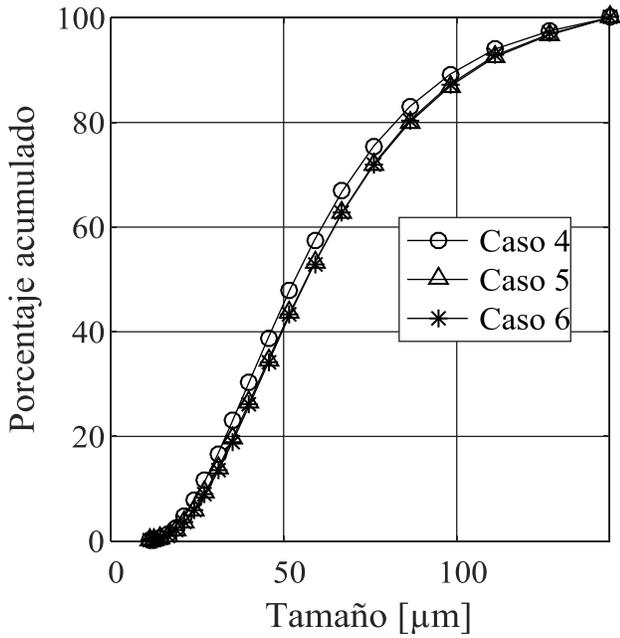


(c) Overflow experimental.

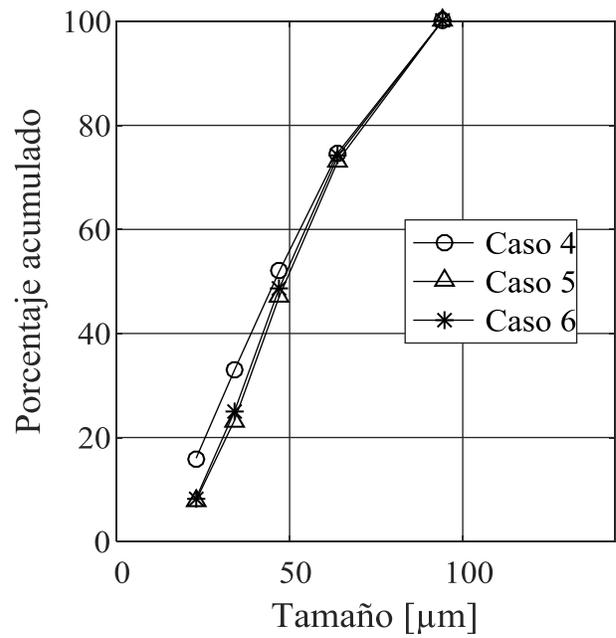


(d) Overflow numerico.

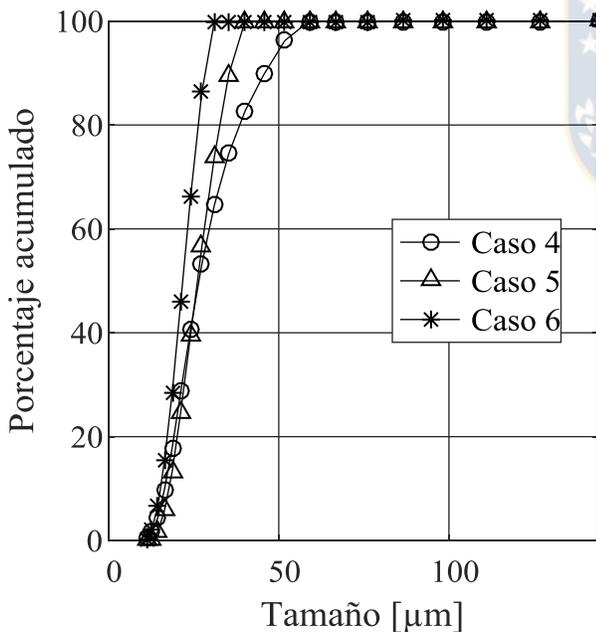
Figura 27. Granulometrias de descarga *underflow* *overflow* para casos 1, 2 y 3.



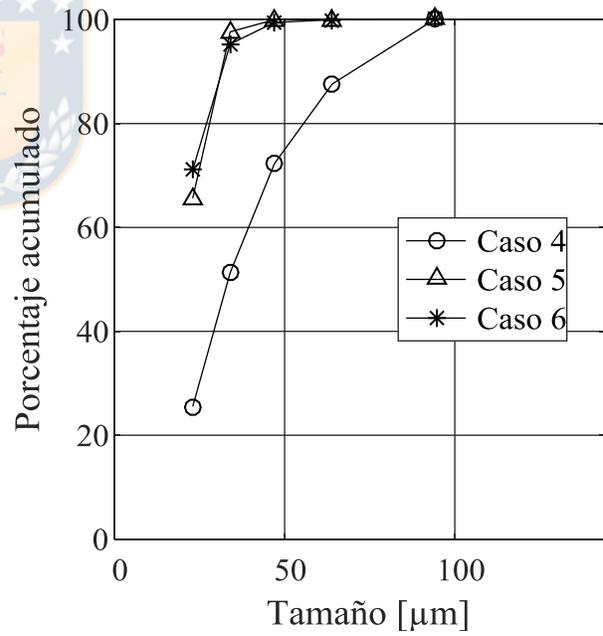
(a) Underflow experimental.



(b) Underflow numérico.



(c) Overflow experimental.



(d) Overflow numérico.

Figura 28. Granulometrías descarga underflowy overflow para casos 4, 5 y 6.

3.3. Análisis de resultados

3.3.1. Medición de flujos.

En la Figura 14 se observa que el flujo másico *underflow* numérico se acerca al experimental, además sigue la misma tendencia, mientras que para el *overflow* existe una diferencia considerable para los casos 1 y 2. Al analizar la Figura 16 se concluye que esto se debe a un exceso de agua, ya que el flujo másico descargado de sólidos numérico se mantiene cercano al experimental. Éste exceso corresponde al volumen desplazado de agua por parte de los sólidos inmersos, a medida que se genera la distribución radial de tamaños, por lo que para mejorar los resultados se recomienda aumentar el tiempo de simulación ya que, de esta forma se logra terminar de generar la distribución anterior mencionada.

Al comparar los flujos *underflow* para una misma presión de alimentación, pero distinta granulometría, se observa que éste aumenta cuando la granulometría es más gruesa, esto es observable en la Figura 14, en donde los flujos *underflow* de los casos 4, 5 y 6, son mayores a los flujos de los casos 1, 2 y 3, respectivamente. Por otra parte, para el *overflow*, ocurre completamente lo contrario, existe una disminución lógica del flujo en los casos de granulometría gruesa. De la misma forma, se sigue la misma tendencia respecto al flujo de sólidos en las dos descargas, mientras que, por el contrario, el flujo de agua en las dos descargas no se ve afectado al interactuar con distintas granulometrías, esto observable en la Figura 15 y Figura 16.

Al aumentar el flujo de alimentación en un hidrociclón, el flujo de agua y sólidos descargados en el *underflow* y *overflow* deben aumentar también, esto se cumple para la mayoría de los flujos, pero al observar detenidamente la Figura 16, el flujo de sólidos descargados en el *overflow*, ya sea el experimental o el numérico, no presentan una tendencia de aumento. Esto se encuentra directamente relacionado con el tipo de descarga presente en el caso 5 y 6, ya que, para estos casos, el hidrociclón se encuentra en un estado de descarga tipo *roping*.

De acuerdo a la Figura 17, la fracción sólida en la descarga *underflow* aumenta para un mayor flujo de alimentación a granulometría constante, y también aumenta al engrosar la granulometría a flujo constante. Por otra parte, para la fracción sólida en la descarga *overflow* ocurre completamente lo contrario, ésta disminuye al aumentar el flujo, y al engrosar la granulometría.

En cuanto a la dispersión de los datos del modelo numérico, a partir de la Tabla 9 se observa que los flujos de agua para las dos descargas no presentan gran variabilidad, por el contrario, el flujo de sólidos en el *overflow* para el tercer caso llega a un valor de 39,7% de desviación estándar sobre el promedio, de la misma forma, la fracción de sólido en el *overflow* también posee altos valores. Por otra parte, la fracción de sólido en el *underflow* permanece estable.

Las mayores variaciones de flujo promedio numérico respecto al valor experimental se encuentran para los flujos de agua en el *overflow* para los primeros dos casos, afectando de forma directa el flujo total *overflow*, los demás valores se encuentran relativamente bajos, por lo que se considera que los resultados obtenidos del modelo numérico son representativos.

En la Tabla 12 se muestra un cuadro resumen de influencia del aumento de flujo y engrosamiento de la granulometría sobre las variables medidas.

Tabla 12. Cuadro resumen de influencia sobre flujos.

Medición	Aumento de flujo	Engrosamiento granulometría
Flujo de agua <i>underflow</i>	Aumenta	No cambia
Flujo de agua <i>overflow</i>	Aumenta	No cambia
Flujo de sólidos <i>underflow</i>	Aumenta	Aumenta
Flujo de sólidos <i>overflow</i>	Aumenta	Disminuye
Flujo total <i>underflow</i>	Aumenta	Aumenta
Flujo total <i>overflow</i>	Aumenta	Disminuye
Fracción sólida <i>underflow</i>	Aumenta	Aumenta
Fracción sólida <i>overflow</i>	Disminuye	Disminuye

Con los flujos *underflow* y *overflow* obtenidos, es posible calcular la razón de circulación para cada condición de operación, esta se presenta en la Figura 29. Es posible notar que cuando el hidrociclón opera en *roping*, se produce un mayor aumento de la razón de circulación entre casos de una misma granulometría en comparación a cuando éste opera en *spray*.

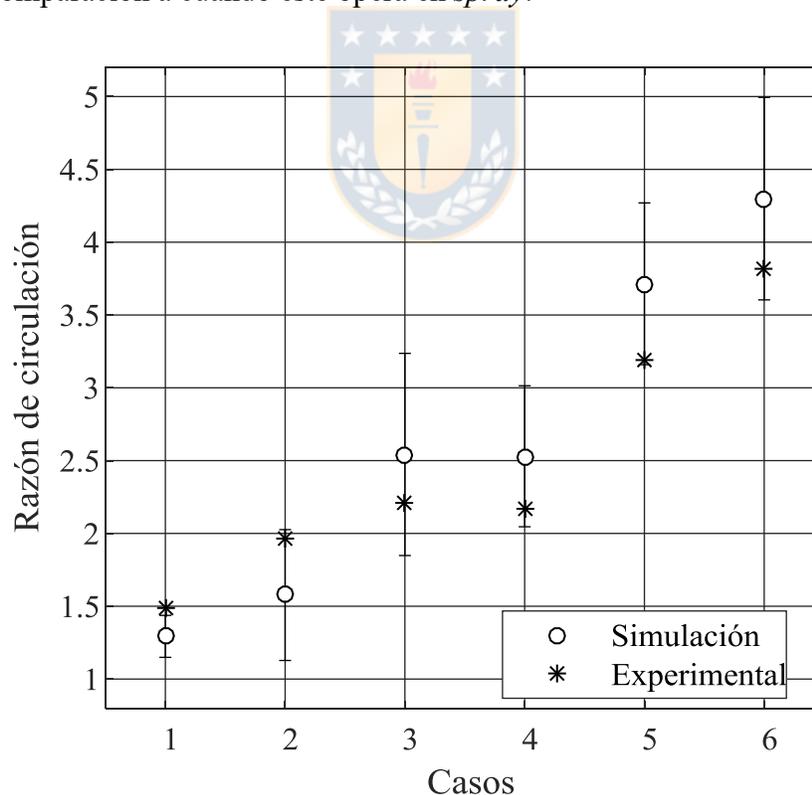


Figura 29. Razón de circulación.

3.3.2. Comportamiento del núcleo de aire y *underflow*.

Como es apreciable en la Figura 13, los flujos *underflow* y *overflow* son variables en el tiempo, por lo que el núcleo de aire y ángulo de descarga también lo son, pero las fluctuaciones de flujo que se presentan para un mismo caso no son suficientes para lograr un cambio considerable en el ángulo, es por esto que se da sólo un valor para cada condición de operación.

En la Figura 18, a medida que aumenta el flujo de alimentación en el hidrociclón, para una misma granulometría y fracción volumétrica, se observa una disminución en el tamaño del núcleo de aire, mientras que, para distintas granulometría y mismo flujo, también se produce una disminución en el núcleo de aire. Las diferencias entre el caso 1 y caso 2 no son muy notorias, sin embargo, al observar detenidamente el caso 3, se puede distinguir claramente una disminución en el tamaño y un cambio en la forma de este. En el caso 4 se observa un núcleo de aire inestable, el cual pierde continuidad separándose en tres tramos para el instante obtenido. Para los casos 5 y 6, donde el hidrociclón opera bajo una condición de descarga *roping*, el núcleo de aire desaparece por completo. De esta forma se corrobora la teoría de la no existencia de núcleo de aire en el *roping*.

La razón de diámetros de descargas del hidrociclón utilizado corresponde aproximadamente a 0,6, por lo que, de acuerdo a investigaciones realizadas, el hidrociclón no debiera operar el *roping* bajo ninguna circunstancia [Bustamante, 1991; Concha *et al.*, 1996], sin embargo, los casos analizados contradicen rotundamente los resultados obtenidos anteriormente por parte de los investigadores.

De acuerdo a la Figura 19, se observa para los primeros dos casos, que el material granular se distribuye a lo largo de todo el hidrociclón, mientras que, en el tercer caso, el material se distribuye mayoritariamente en la zona cónica del mismo, y esto se repite para los casos 4, 5 y 6. Por otra parte, es de notar que el rango de fracción volumétrica de sólido dentro del hidrociclón, es similar para los casos 1, 2, 3, 4 y 5, mientras que el sexto caso posee valores más altos. En el quinto caso se logra apreciar lo que parece ser un núcleo de agua al interior del hidrociclón, mientras que este desaparece por completo al aumentar al flujo de alimentación, como es posible ver en el caso 6.

Debido a las fuerzas de cuerpo de las partículas, existe una acumulación de material en las cercanías de las paredes del hidrociclón, esta acumulación se amplía cuando se aumenta el flujo de alimentación, esto es visible en la Figura 19. Por otra parte, al engrosar la granulometría de alimentación también se observa esta acumulación. Se asume que esta acumulación de material aporta en la rotura del núcleo de aire del hidrociclón, provocando una condición de descarga *roping*.

En cuanto a la Figura 20, se observa que para la granulometría 1, al aumentar la presión de alimentación, se produce una disminución en el ángulo de descarga. Por otra parte, al engrosar la granulometría, para un mismo flujo, también se produce dicha disminución. Esto es corroborado experimentalmente de acuerdo a la Figura 21. De acuerdo a la Tabla 11, se observa que los ángulos de descarga numérico y experimental siguen una clara tendencia, y el tipo de descarga coincide en cada caso.

3.3.3. Curvas de clasificación.

En la Figura 22 se observa que las curvas de clasificación experimental y del modelo numérico son similares entre sí. Las diferencias apreciables, se deben a menor cantidad de tamaños considerados en el modelo numérico.

A partir de la Figura 23, para los primeros tres casos se observa que las curvas de clasificación siguen una clara tendencia ya sea de forma experimental o numérica. Se puede apreciar que la curva del segundo caso, se encuentra sobre la del primer caso, esto indica que al aumentar la presión de 0,5 a 1 [bar] aumenta el porcentaje de partículas que es descargado en el *underflow*. Por otra parte, también se observa que la curva del tercer caso para diámetros más grandes se encuentra encima, y luego cruza las demás curvas, luego se deduce que al aumentar la presión aún más, se logra una optimización de la clasificación, debido a que aumenta la pendiente de la curva para el diámetro de corte.

En cuanto a la Figura 24, se observa que en los casos en que hay *roping* se produce el fenómeno de “*fishhook*”, de tal forma que en el caso 5, para el tamaño 12,7 [μm], el 90% de su contenido es descargado en el *underflow*. Por otra parte, en los casos en que el hidrociclón se encuentra en un estado de descarga *spray*, no existe dicho fenómeno. En las curvas obtenidas del modelo numérico no es observable el “*fishhook*” debido a que los tamaños considerados en el modelo numérico no son los suficientemente pequeños para que ocurra el fenómeno. Éste comportamiento es totalmente indeseable debido a que promueve la mala clasificación y el aumento de la carga circulante.

De acuerdo a la Figura 22, es posible notar, que generalmente la curva de clasificación obtenida de los resultados experimentales tiende a encontrarse a la derecha de la curva numérica, y esto se puede corroborar al observar la Tabla 11, dónde los diámetros de corte obtenidos a partir del modelo computacional son siempre mayores a los experimentales.

3.3.4. Granulometrías.

A primera vista, en la Figura 25, se puede observar que la granulometría del *underflow* obtenida del modelo computacional se encuentra desplazada a la izquierda respecto a la granulometría experimental para cada condición de operación. Por consiguiente, sucede lo contrario en las granulometrías del *overflow*. Una de las razones que influyen en este comportamiento, es la baja cantidad de diámetros considerados en el modelo numérico respecto a los diámetros considerados en la granulometría experimental.

De la Figura 27, se observa que las granulometrías del *underflow* para los primeros dos casos son prácticamente idénticas, mientras que al aumentar la presión la curva se desplaza hacia la derecha. Por otra parte, en el *overflow* ocurre lo contrario, la curva se desplaza hacia la izquierda. Esto indica que a mayor presión, la granulometría del flujo de sólidos en el *underflow* se engrosa, y en el *overflow* se vuelve más fina. Por otra parte, se puede observar que para los casos *roping*, la granulometría del *underflow* es casi idéntica.

Cabe destacar, que al igual que en las curvas de clasificación, las principales diferencias entre el modelo numérico y resultados experimentales, se deben a la baja cantidad de diámetros considerados en la modelación respecto a lo experimental.

CAPITULO 4

Relación entre la hidrodinámica operacional y estado vibratorio

4.1. Modelo computacional.

El modelo computacional utilizado para este análisis es similar al utilizado en el capítulo anterior, las diferencias son las siguientes:

- El hidrociclón de estudio es diferente, luego existen cambios en la geometría y grilla computacional.
- Las condiciones de operación son distintas (caudal, concentración y granulometría).

Otros componentes del modelo no cambian, tales como condiciones de borde, volumen de control, modelos multifase y de turbulencia, etc.

4.1.1. Geometría de hidrociclón.

En la Figura 30 se presenta la geometría del hidrociclón de laboratorio utilizado y en la Tabla 13 se presentan las dimensiones del equipo

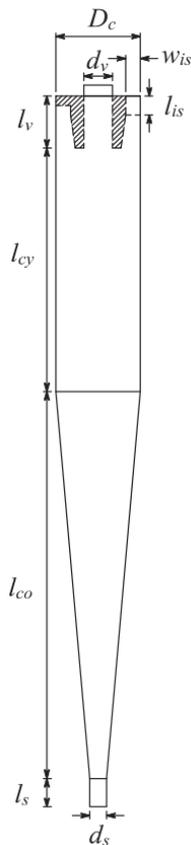


Tabla 13. Dimensiones hidrociclón.

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro sección cilíndrica	D_c	75 [mm]
Diámetro vortex finder	d_v	40 [mm]
Diámetro de ápex	d_s	15 [mm]
Largo sección cilíndrica	l_{cy}	350 [mm]
Largo sección cónica	l_{co}	230 [mm]
Largo vortex finder	l_v	40 [mm]
Largo ápex	l_s	150 [mm]
Largo sección alimentación	l_{is}	30 [mm]
Ancho sección alimentación	w_{is}	5 [mm]

Figura 30. Geometría hidrociclón.

4.1.2. Grilla computacional.

Se simplifica la geometría de la alimentación del hidrociclón cambiando la sección transversal circular original por una cuadrada. Este cambio se realiza de tal modo que el área transversal permanezca constante, así se mantiene la velocidad de alimentación y permite utilizar un mallado estructurado en la unión entre la tubería de alimentación y el cuerpo del ciclón. La confección de la grilla computacional se realizó con elementos hexaédricos, refinando las zonas cercanas a la pared, así mantener un valor razonable de y^+ para la utilización de funciones de pared estándar. En la Tabla 12 se muestra las características del mallado.

Tabla 12. Características de grilla.

Característica	Valor
Cantidad de elementos	251350
Calidad de elementos (EquiSizeSkew)	0-0.5
Razón de aspecto máxima	30

Se optimiza la cantidad de elementos para obtener buenos resultados y no exceder el costo computacional del modelo. La calidad y razón de aspecto de los elementos permanece dentro de valores razonables.

4.1.3. Descripción de casos a simular.

Este estudio se basa en el análisis de fuerza y vibración de dos condiciones operacionales del hidrociclón, una *spray* y otra *roping*. Para cada uno de ellos se mide de forma experimental la vibración, y mediante la modelación numérica se calcula la fuerza neta provocada por la hidrodinámica al interior del hidrociclón sobre las paredes del equipo. Para la validación del modelo se mide experimentalmente y se calcula numéricamente los flujos *underflow* y *overflow*, además de la concentración de sólido en cada una de las descargas. De este modo, se busca describir el comportamiento y la relación entre vibración y fuerza excitatoria para cada tipo de operación. La descripción de los casos se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Casos de estudio

Caso I	Caso Roping
- Underflow: <i>spray</i> .	- Underflow: <i>roping</i> .
- Granulometría 1 ($d_{50} = [\mu\text{m}]$).	- Granulometría 2 ($d_{50} = [\mu\text{m}]$).
- Presión alimentación: [bar].	- Presión alimentación: [bar].
- Velocidad alimentación: [m/s].	- Velocidad alimentación: [m/s].
- Fracción sólida en volumen: 0,2275.	- Fracción sólida en volumen: 0,2275.

Las granulometrías de alimentación se muestran en la Figura 31.

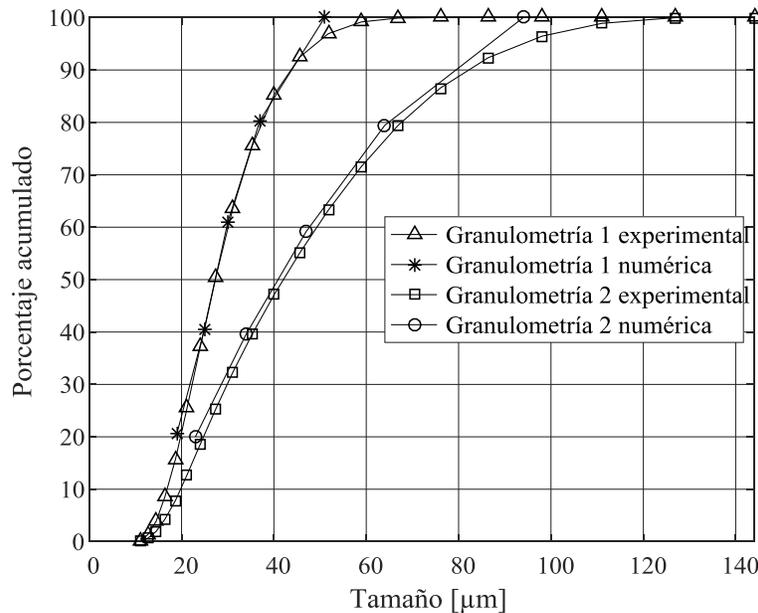


Figura 31. Granulometrías (a) experimentales y (b) numéricas.

4.2. Resultados.

4.2.1. Cálculo de flujos.

Para el primer caso, la modelación numérica replica de buena forma el tipo de descarga *spray*. Durante la segunda medición experimental, el hidrociclón operó cercano al *semi-roping*, por lo que pequeñas diferencias en la medición de flujos se vieron reflejadas en una condición *semi-roping* no esperada en la modelación numérica.

En la Tabla 14 se presenta flujo de agua en underflow, flujo de agua en overflow, flujo de sólidos en underflow, flujo de sólido en overflow, underflow, overflow, fracción volumétrica de sólido en underflow, fracción volumétrica de overflow, donde (a): medición experimental y (b): promedio simulación, donde se evidencian diferencias considerables en la predicción de flujo de material granular, sin embargo la predicción del agua es buena.

Se calcula el balance de flujos para cada caso, y además integrando, se obtiene la masa acumulada dentro del hidrociclón el tiempo. Los resultados se observan en la Figura 32.

Tabla 14. Flujos y concentraciones.

Caso		$\dot{m}_{w,u}$ [kg/s]	$\dot{m}_{w,o}$ [kg/s]	$\dot{m}_{s,u}$ [kg/s]	$\dot{m}_{s,o}$ [kg/s]	\dot{m}_u [kg/s]	\dot{m}_o [kg/s]	% V_u	% V_o
I	a	0.177	0.579	0.127	0.104	0.304	0.683	45.8	31.1
	b	0.177	0.579	0.117	0.104	0.294	0.683	42.9	35.2
II	a	0.082	1.230	0.187	0.105	0.270	1.335	41.6	15.2
	b	0.082	1.202	0.167	0.120	0.249	1.322	39.6	15.2

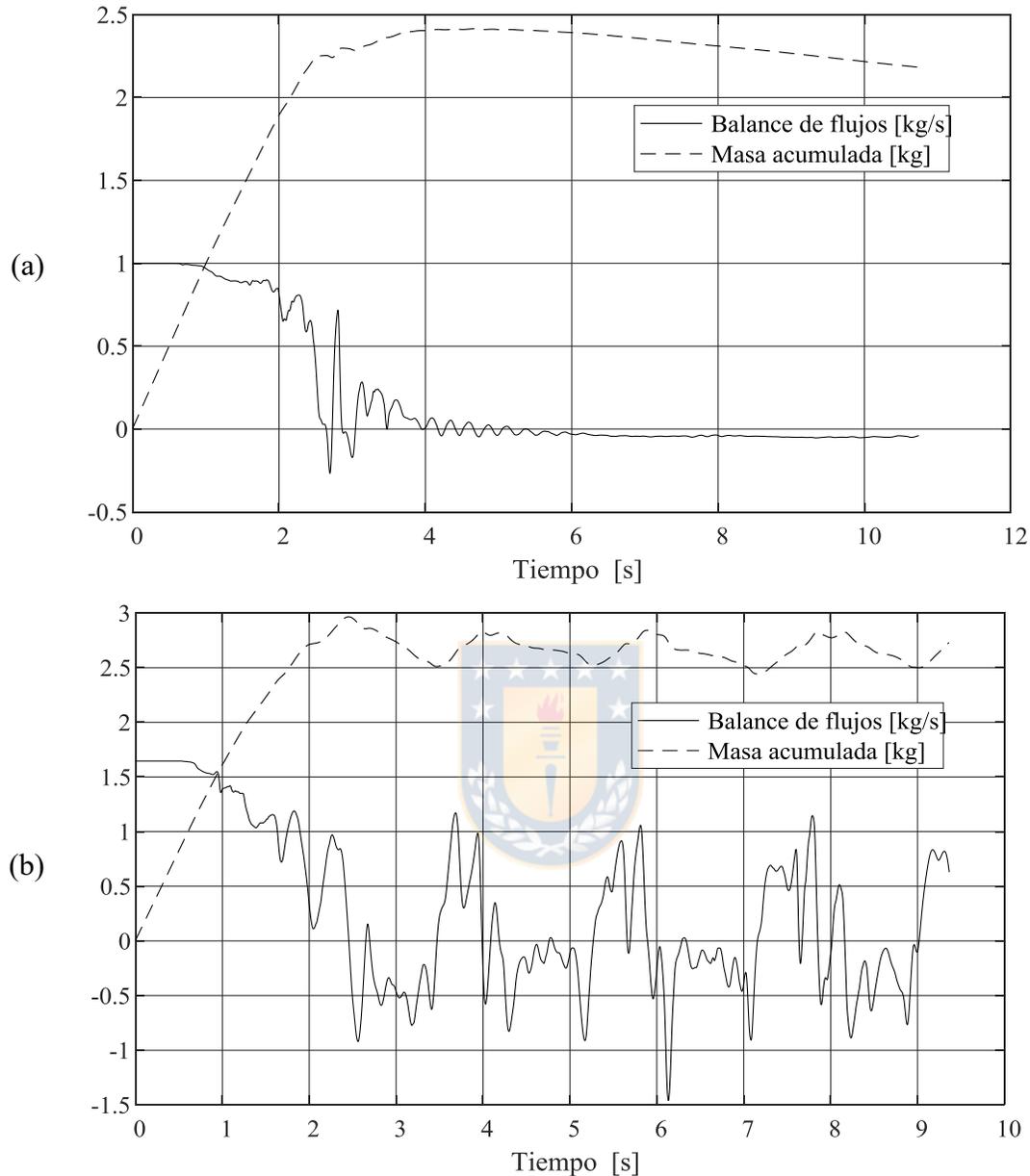


Figura 32. Balance de flujo y masa acumulada, para (a) spray y (b) roping.

4.2.2. Cálculo de fuerzas

Mediante la modelación numérica se obtiene las componentes de fuerza y momento netas sobre el hidrociclón, estas cargas se originan a partir de la presión y esfuerzos de corte sobre las paredes del equipo. En la Figura 33 y Figura 34 se muestran las cargas por dirección para cada caso.

El eje coordenado z corresponde al eje axial del hidrociclón con sentido positivo desde *apex* a *vortex finder*, mientras que la coordenada y tiene la misma dirección que el flujo de alimentación pero con sentido contrario. Por otra parte el eje x se encuentra a 90° anti-horario respecto al eje y . Estos ejes

coordenados se encuentran ubicados estratégicamente en el extremo inferior del hidrociclón, tal que el cálculo de momentos se hace respecto a este punto.

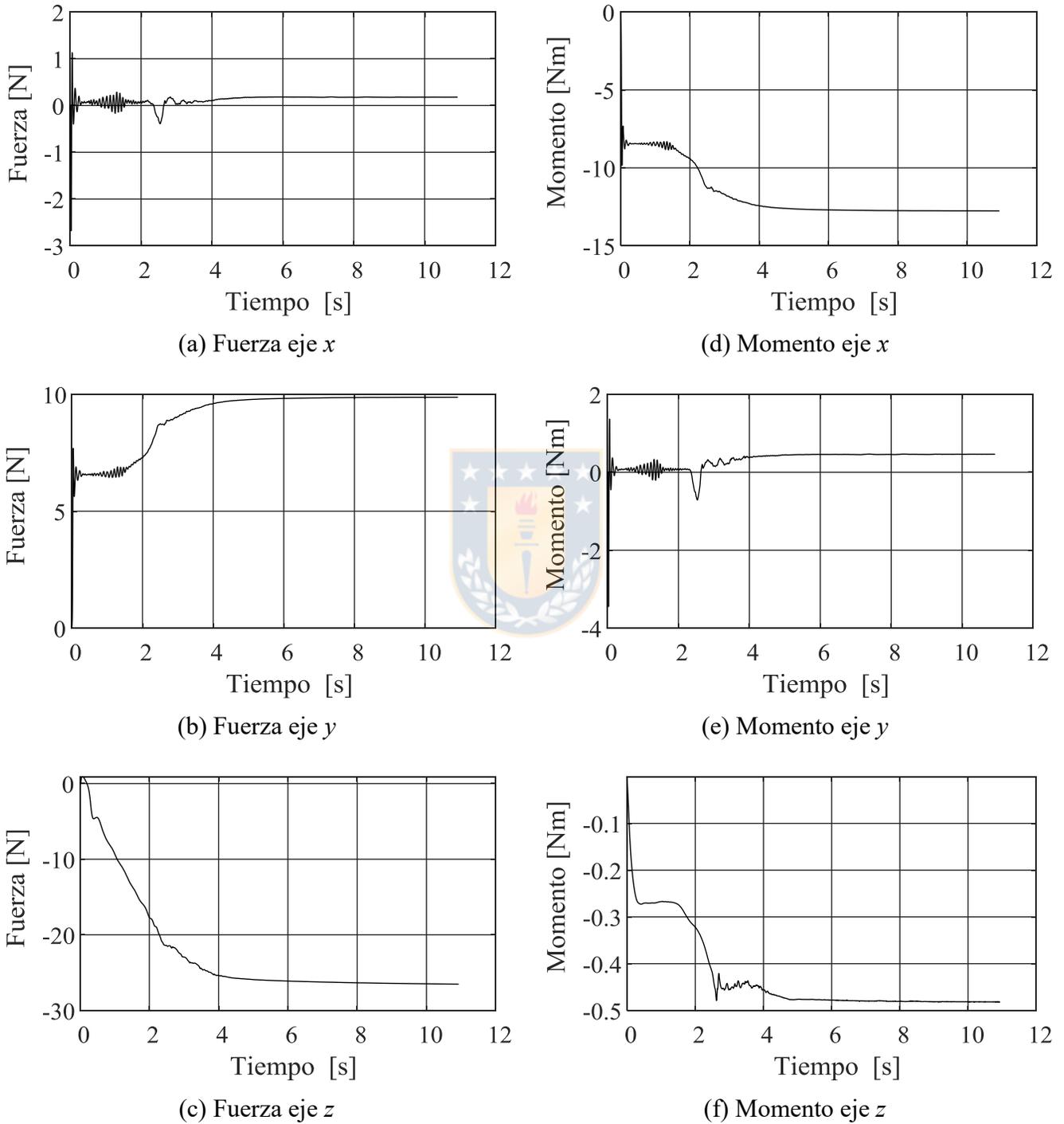


Figura 33. Cargas para caso I.

Se observa que las cargas en el caso I se tornan estables aproximadamente a los 6 segundos de cálculo. Por otra parte, en el caso II las cargas no poseen una estacionalidad, por lo que se asume que es un fenómeno transiente que cambia de acuerdo a las condiciones internas del flujo.

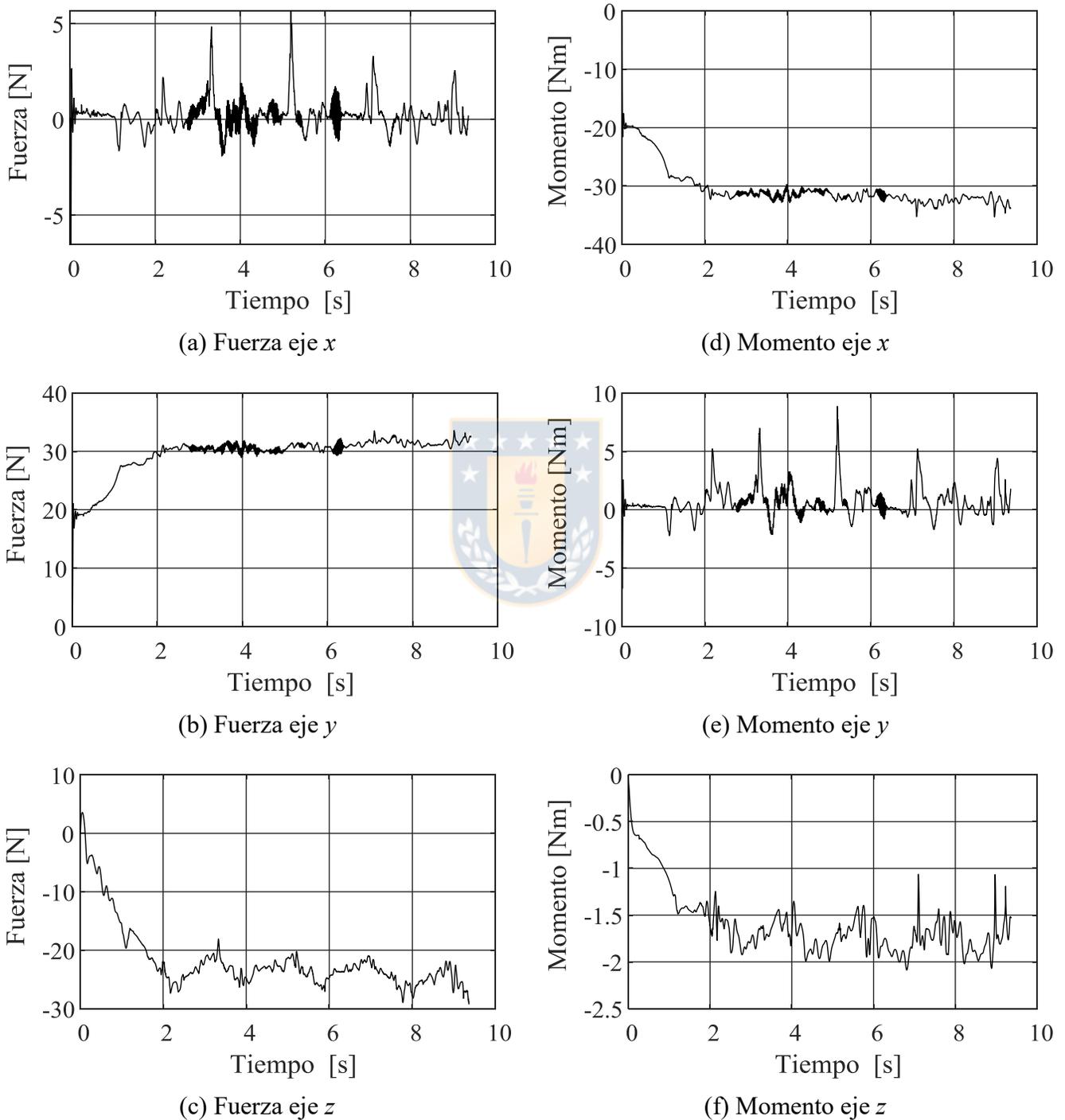


Figura 34. Cargas para caso II.

4.2.3. Medición de vibración

La medición de vibración se realiza en dos ejes radiales y uno axial, que coinciden con la dirección y sentido de los ejes x , y , z presentes en el cálculo de fuerzas. En la Figura 35 se muestra la forma de onda de la aceleración para el eje x . El comportamiento es similar para todos los ejes coordenados. En ambos casos es posible observar oscilaciones en la forma de onda, sin embargo, en el caso II es mayor la variación de amplitud.

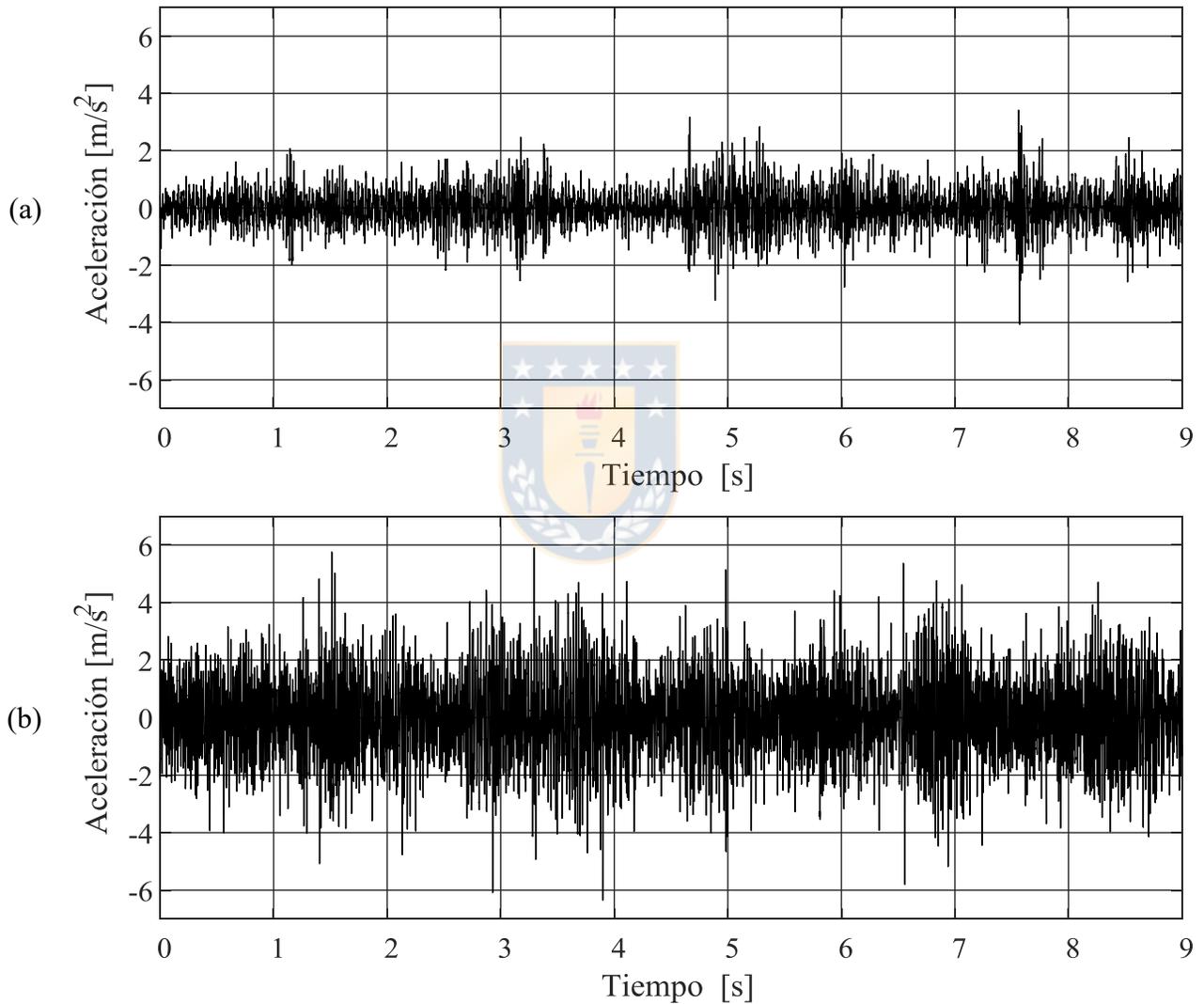


Figura 35. Forma de onda de aceleración en (a) caso I y (b) II.

4.2.4. Espectros de fuerza y aceleración.

Se realiza el espectro de fuerza en eje x para cada caso a partir de los resultados mostrados en la Figura 33 (a) y Figura 34 (a), al mismo tiempo se realiza el espectro de aceleración a partir de las formas de ondas mostradas en la Figura 35. En la Figura 36 y Figura 37 se muestra la comparación entre espectros de fuerza y aceleración para cada caso.

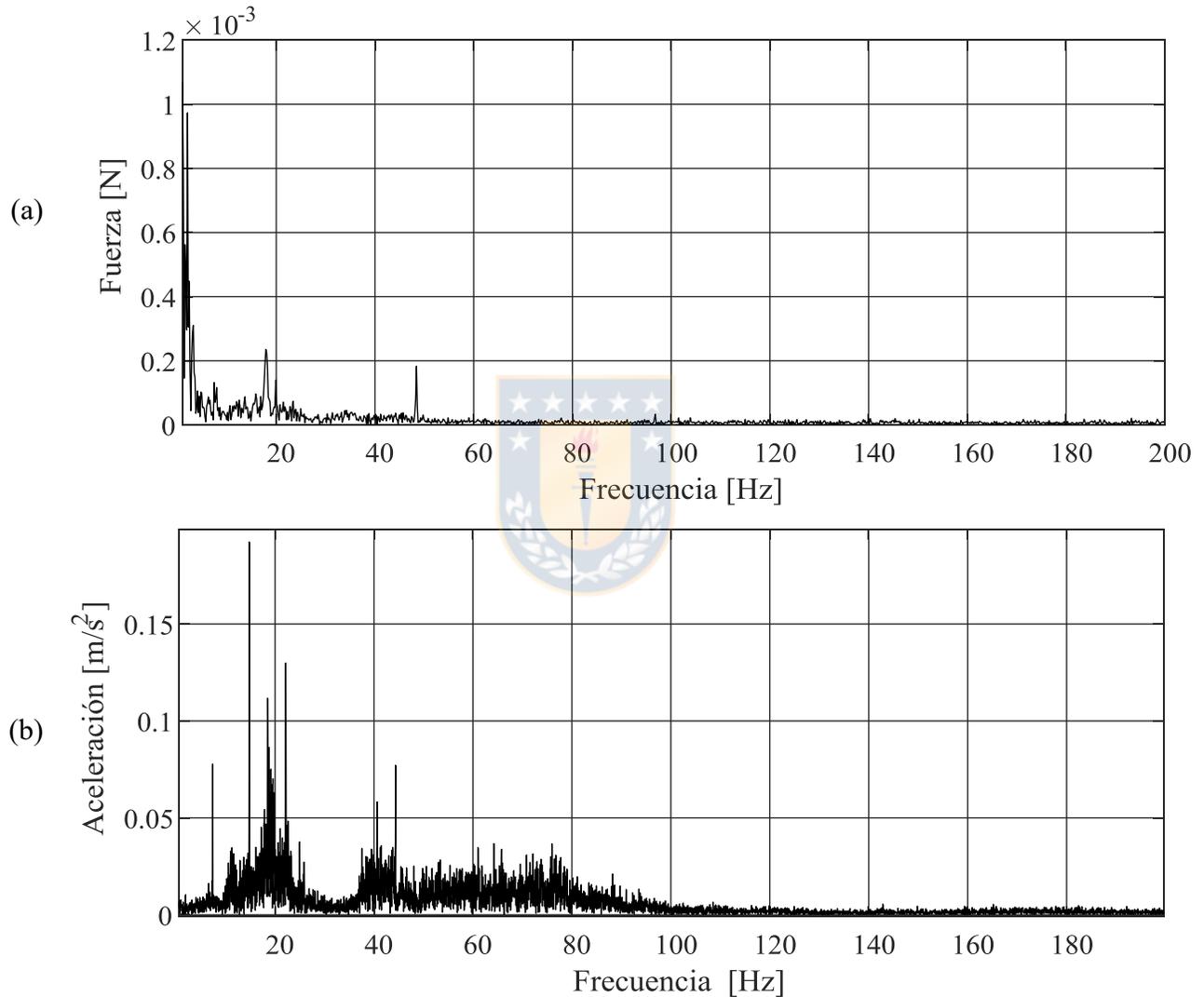


Figura 36. Espectro de (a) fuerza y (b) vibratorio para el caso I.

En el caso I el espectro de fuerza muestra dos componentes que sobresalen respecto a las demás, cercanas a 18 [Hz] y 48 [Hz] aproximadamente, mientras que en el espectro aceleración, se puede observar altas amplitudes cercanas a 20 [Hz] y a 40 [Hz]. Por otra parte, en la Figura 37, en el caso II se observa que los dos espectros presentan un aumento en las amplitudes cercanas a 45 [Hz]. Por lo tanto, en ambos casos se observan comportamientos similares entre fuerza y vibración.

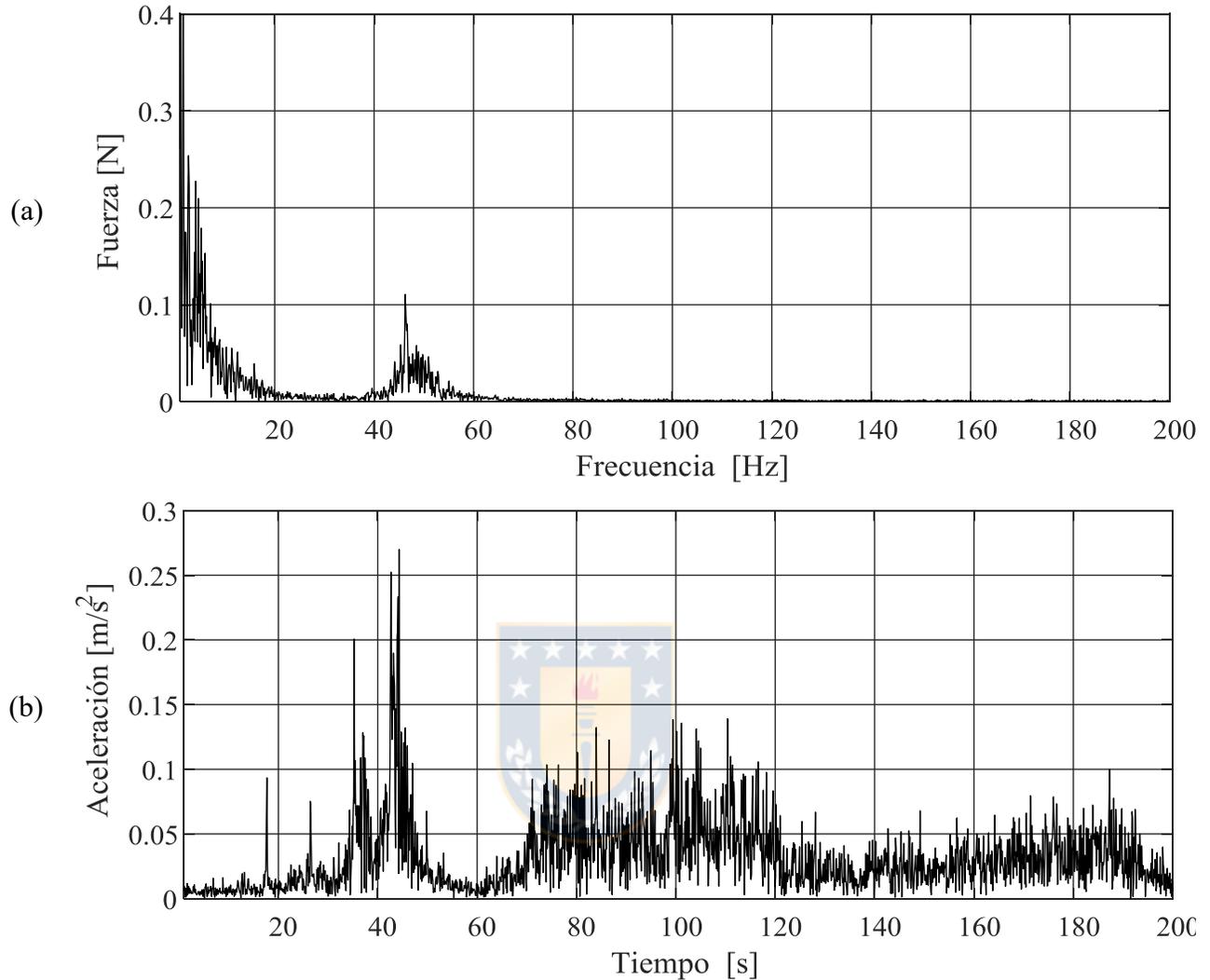


Figura 37. Espectro de (a) fuerza y (b) vibratorio para el caso II.

4.2.5. Espectro fuerza en el tiempo.

A partir de los resultados de fuerza para el eje x , se obtiene la variación del espectro vibratorio en el tiempo. Cada espectro se realiza con un tramo de 1.5 segundos de forma de onda y un desfase de 0.25 segundos. En la Figura 38 y 39 se muestran el cambio en el tiempo para el caso I y caso II respectivamente.

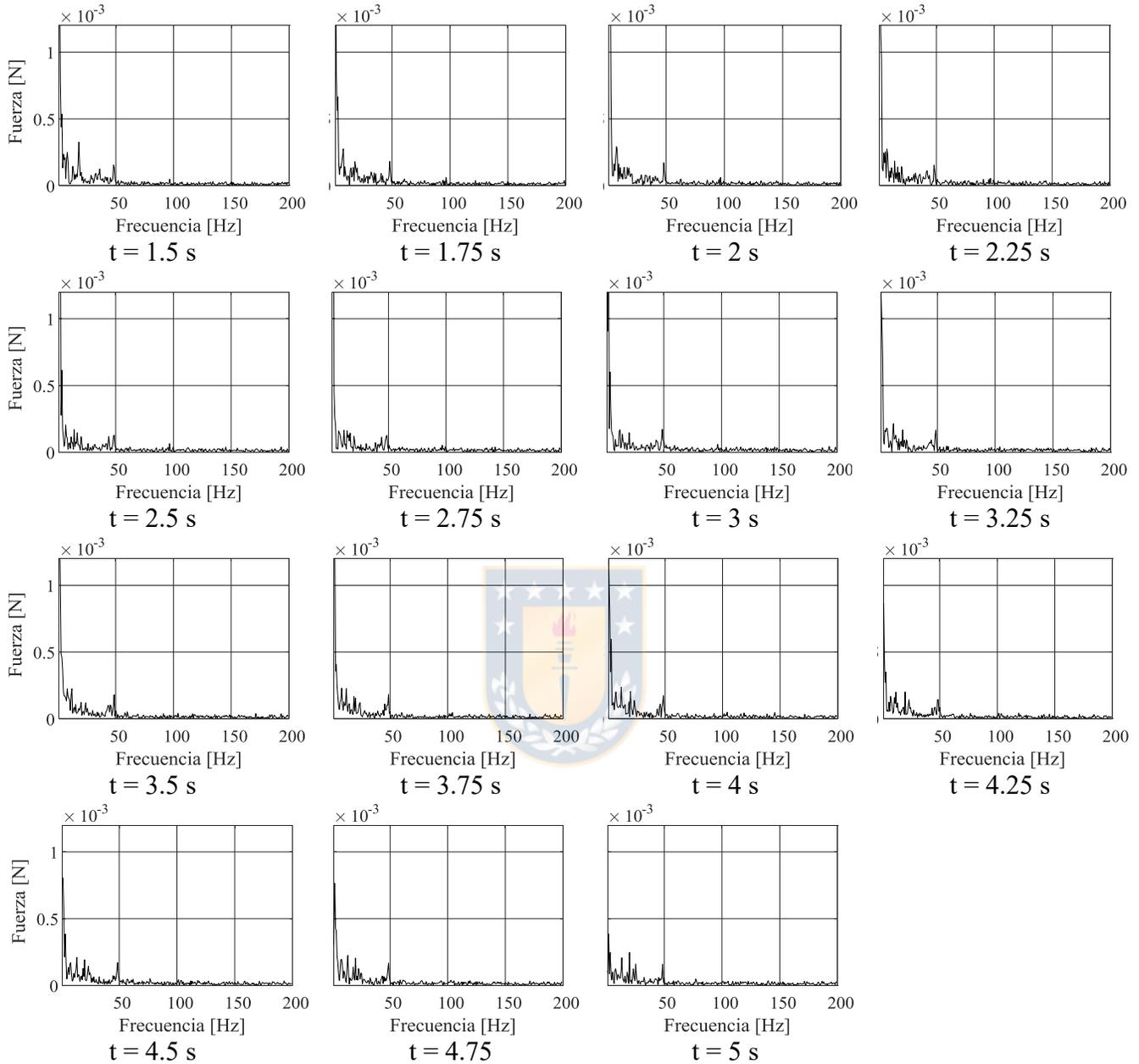


Figura 38. Espectro fuerza en el tiempo para caso I.

4.2.6. Espectro aceleración en el tiempo.

De forma análoga a la fuerza, en la Figura 40 y Figura 41 se observa el cambio en el tiempo del espectro aceleración para el caso I y II respectivamente. Los espectros se realizaron utilizando 1.5 segundos de forma de onda con un desfase de 0.4 segundos.

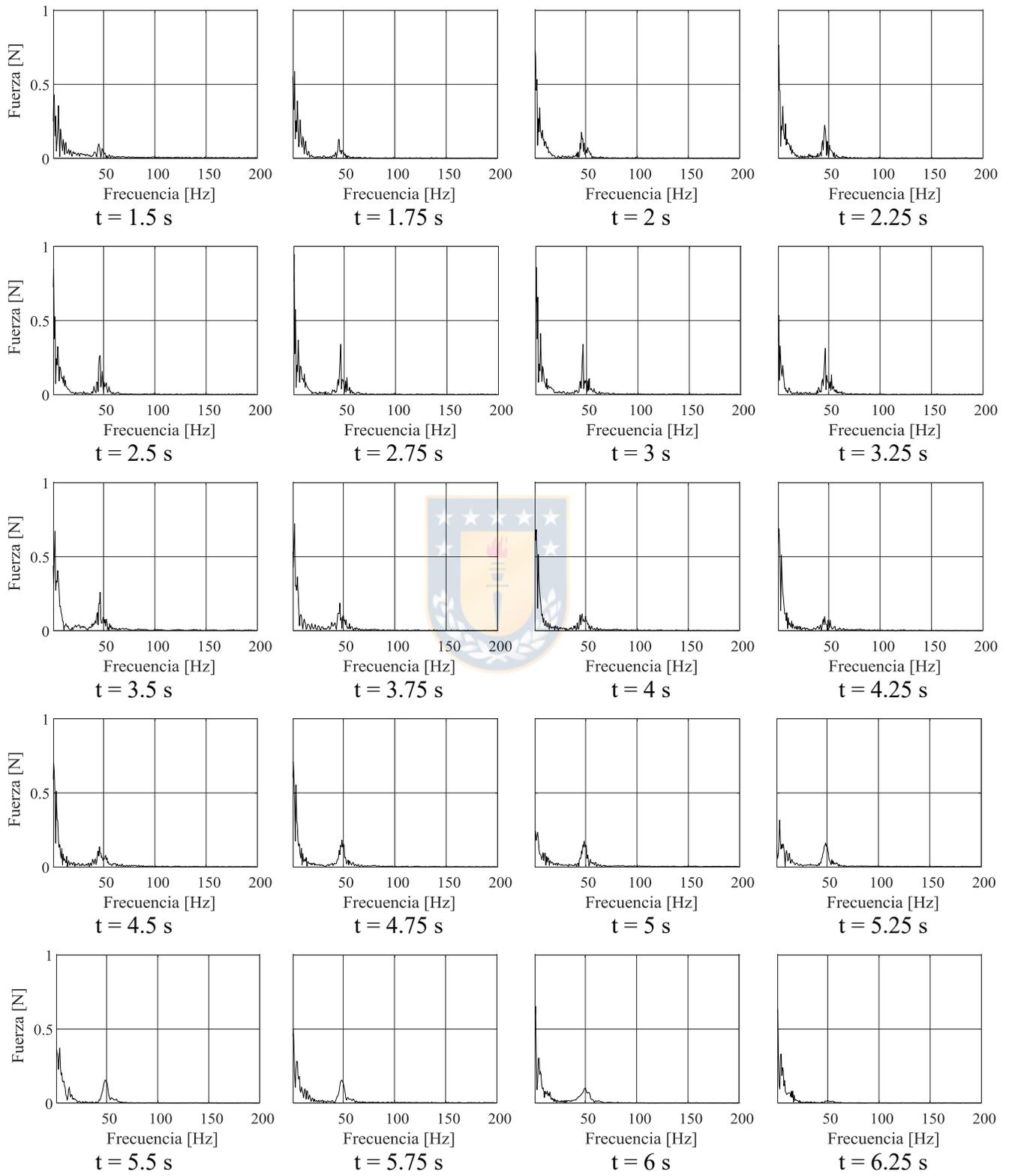


Figura 39. Espectro fuerza en el tiempo para caso II.

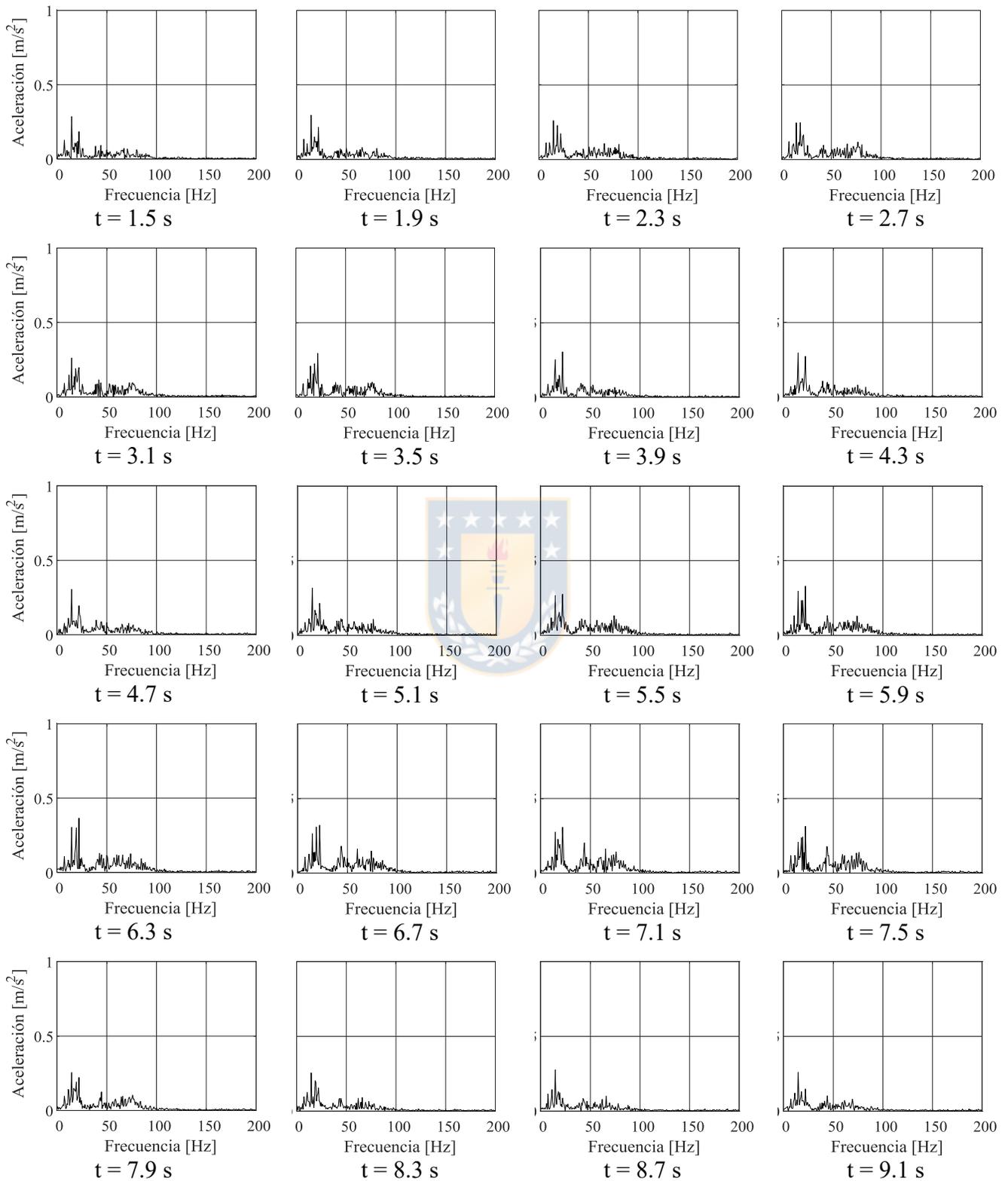


Figura 40. Espectro aceleración en el tiempo para caso I.

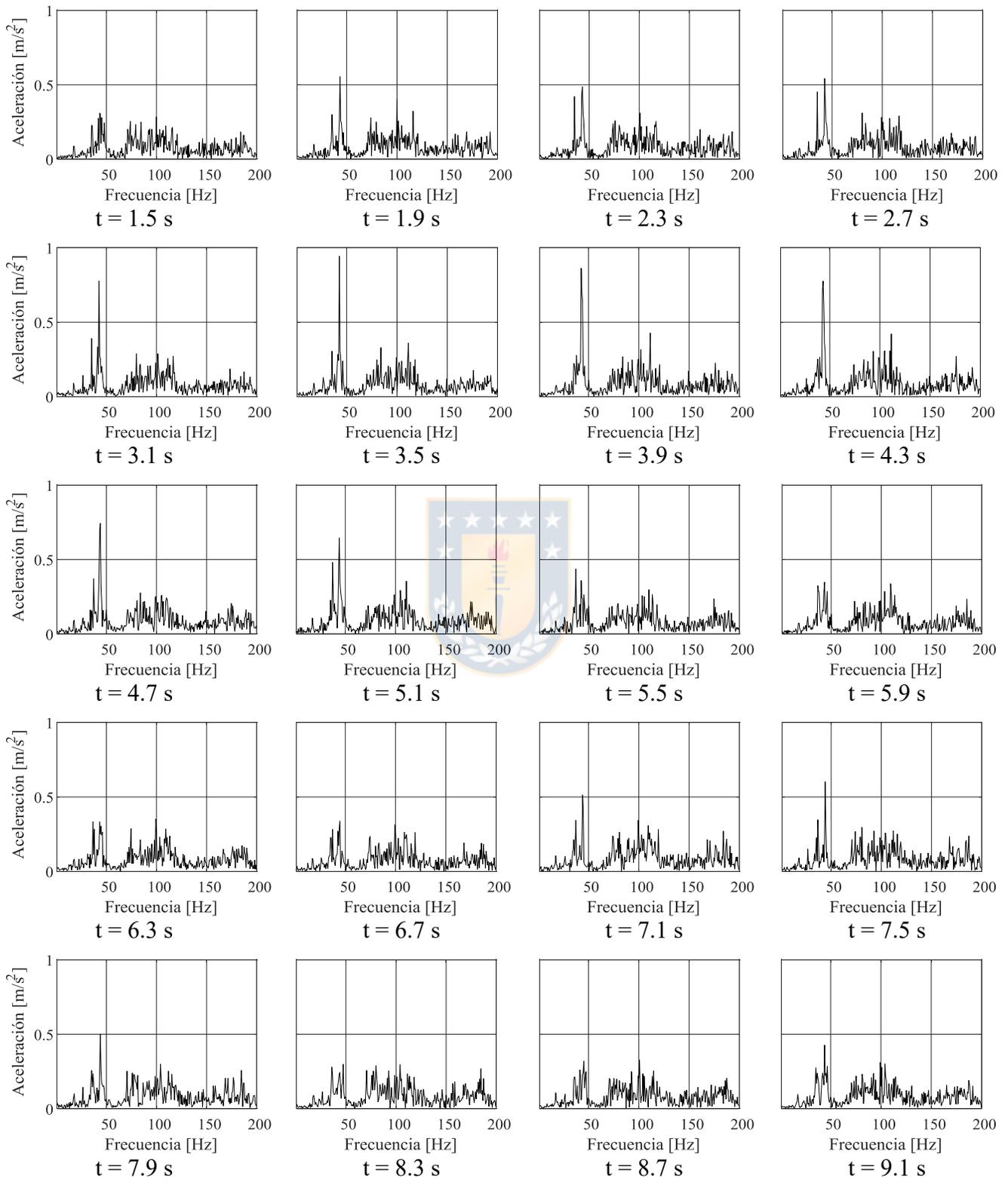


Figura 41. Espectro aceleración en el tiempo para caso II.

4.3. Análisis de resultados

4.3.1. Relación entre la masa acumulada y la fuerza excitadora.

En las Figura 32 (a) y Figura 33 se observa que el hidrociclón en el caso I posee estacionalidad en balance de flujos, sin embargo, en el caso II existe una constante acumulación y des-acumulación de material dentro del equipo visible en la Figura 32 (b), tal que los picos de masa se producen con un periodo entre 1,5 – 2 segundos. Al observar la Figura 34, es posible notar que existen aumentos en la fuerza del eje x a la misma frecuencia que ocurren los picos de masa, tal que cada vez que existe un pico inferior de masa, al mismo tiempo ocurre un pico superior de fuerza. Esto demuestra que existe una clara relación entre masa acumulada dentro del ciclón y fuerza excitadora.

4.3.2. Relación entre la fuerza excitadora y la vibración.

En la Figura 35 se observa que en el caso II existe un aumento y disminución notorio en la amplitud de la forma de onda, mientras que en el caso I este cambio es mucho menor. Al observar detenidamente la forma de onda en el caso II es visible que estos aumentos tienen un periodo entre 1 y 2 segundos, compartiendo el mismo comportamiento oscilante que la fuerza.

Al analizar la Figura 38 es posible notar que el espectro de la fuerza para el caso I no posee grandes variaciones en el tiempo, se mantiene similar, comportamiento que también es observable para la vibración (ver Figura 40).

En el caso II, la Figura 39 muestra una componente de la fuerza un poco menor a 50 [Hz] que aumenta y disminuye, iniciando a los 1.5 segundos con una amplitud baja, luego a los 3 segundos se observa un pick, más adelante se ve un mínimo nuevamente a los 4.25 segundos, para luego volver a aumentar y disminuir. Este comportamiento también es observable en la Figura 41 para la aceleración, donde existe la misma componente un poco menor a 50 [Hz] que oscila.

4.3.3. Integración de análisis

En la Tabla 15 se muestra un resumen integrador del análisis realizado.

Tabla 15. Integración resultados.

Característica	Caso I	Caso II
Balance de flujos	Estacionario	Oscilante
Fuerza excitadora	Estacionario	Oscilante
Vibración experimental	Estacionario	Oscilante

Existe una clara relación entre las características analizadas por cada caso, donde el caso I tiene un carácter estacionario, y el caso II posee un carácter oscilante. Por otra parte, para que existan cambios en la masa acumulada del hidrociclón considerando una alimentación constante, debe haber un cambio en el volumen de aire que se encuentra al interior del hidrociclón, por lo tanto existe una clara relación entre la hidrodinámica al interior del dispositivo y su comportamiento vibratorio.

Como se explicó anteriormente, modelación numérica no replicó de forma exacta el *roping* experimental dando como resultado un *semi-roping* inesperado debido a que durante las mediciones experimentales se operó de forma cercana al roping, inclusive durante la medición de flujos la condición de cuerda se perdió y se produjo *semi-roping* en algunas ocasiones.

CAPITULO 5

Caracterización vibratoria de la transición desde *spray* a *roping*

5.1. Metodología experimental.

Establecida una relación entre fuerza hidrodinámica del flujo y estado vibratorio del dispositivo, en este capítulo se busca discernir de forma clara las diferencias vibratorias para cada condición de operación, por lo tanto se realizan tres pruebas experimentales, la primera en *spray*, la segunda en *semi-roping*, y la tercera en *roping*, tal que cada condición opere alejada de las restantes. El procedimiento experimental se presenta a continuación:

- a) Se carga el hidrociclón con agua y material granular.
- b) Se enciende la bomba y se establece una velocidad de rotación que permita operar en un estado *spray* constante.
- c) Se realiza medición de vibración.
- d) Se aumenta la velocidad de rotación de la bomba hasta lograr una operación *semi-roping* constante. Se repite el punto (c).
- e) Se aumenta la velocidad de rotación de la bomba hasta lograr una operación *roping* constante. Se repite el punto (c).
- f) Se apaga la bomba, y se descarga el equipo.

Así, se logra producir los tres tipos de condiciones de operación variando la presión de alimentación, trabajando a granulometría de alimentación y concentración de sólidos constantes. En la Figura 42 se muestra el setup experimental.



Figura 42. Set-up experimental.

5.2. Resultados.

5.2.1. Forma de onda.

En la Figura 43 se muestra una porción de forma de onda para cada caso.

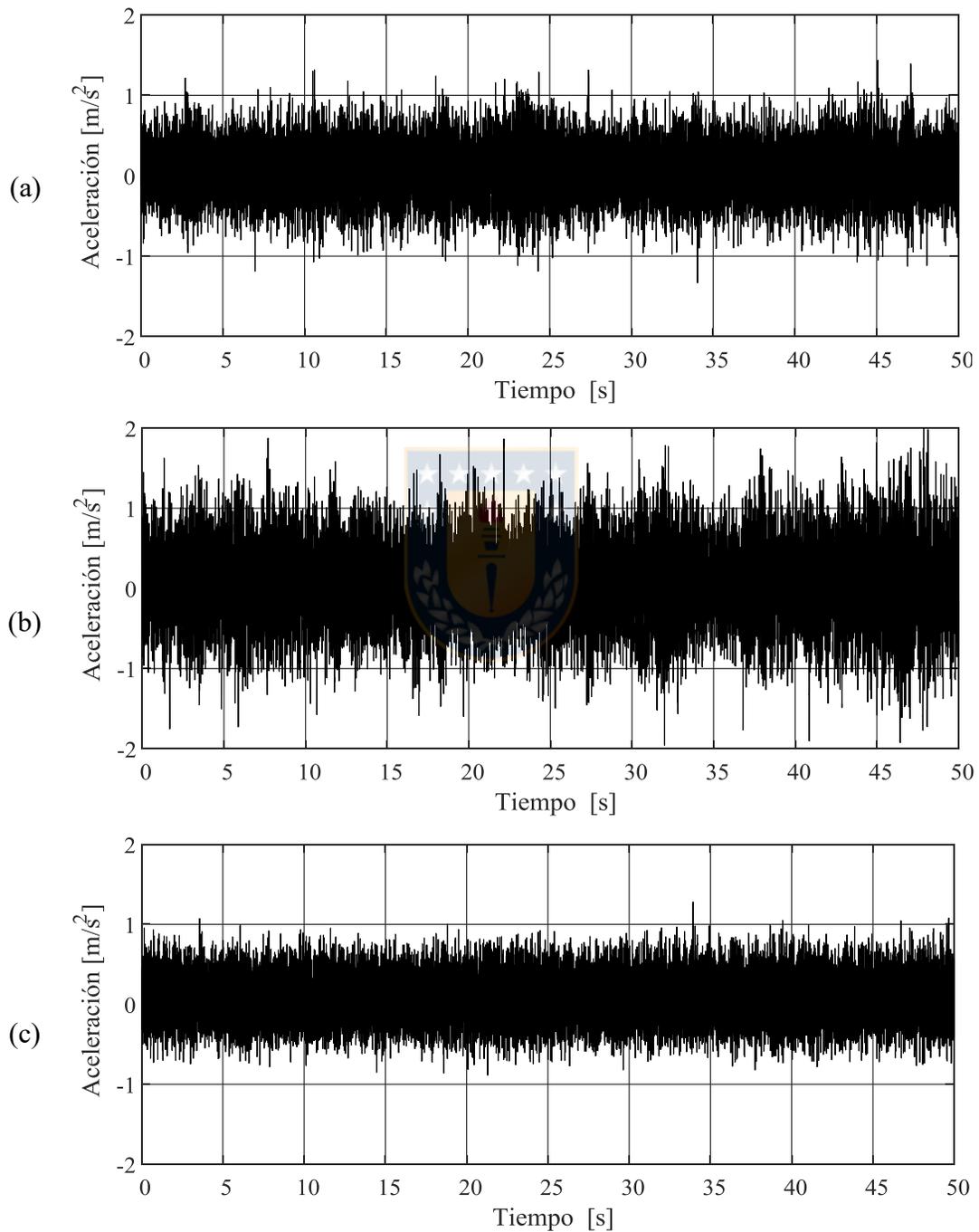


Figura 43. Forma de onda en (a) *spray*, (b) *semi-ropping*, (c) *ropping*.

5.2.2. Espectro de aceleración.

En la Figura 44 se observa el espectro vibratorio para cada caso.

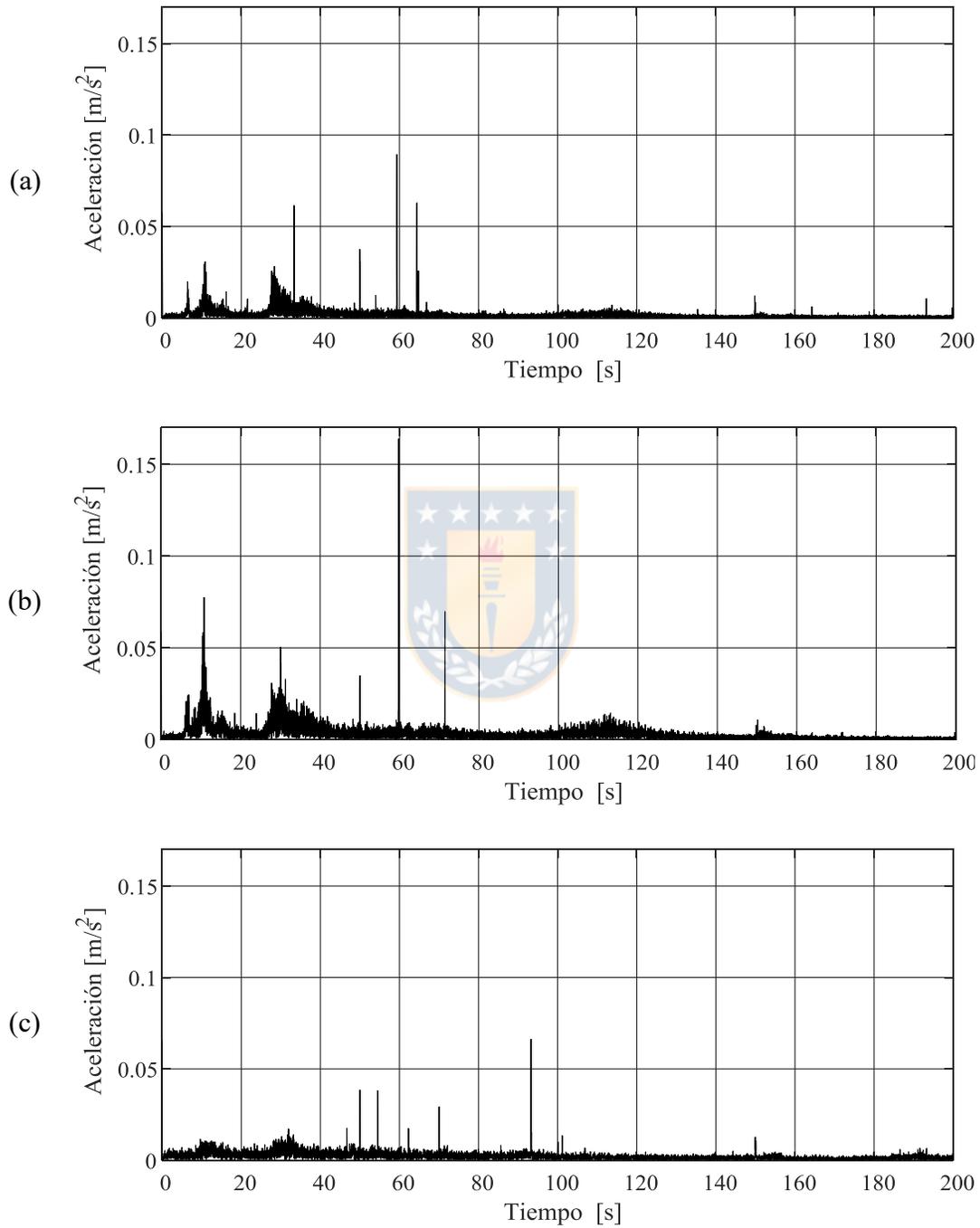


Figura 44. Espectro vibratorio en (a) *spray*, (b) *semi-roping*, (c) *roping*.

5.2.3. Espectro de aceleración en el tiempo.

En la Figura 45 se observa la variación del espectro en el tiempo en *spray*.

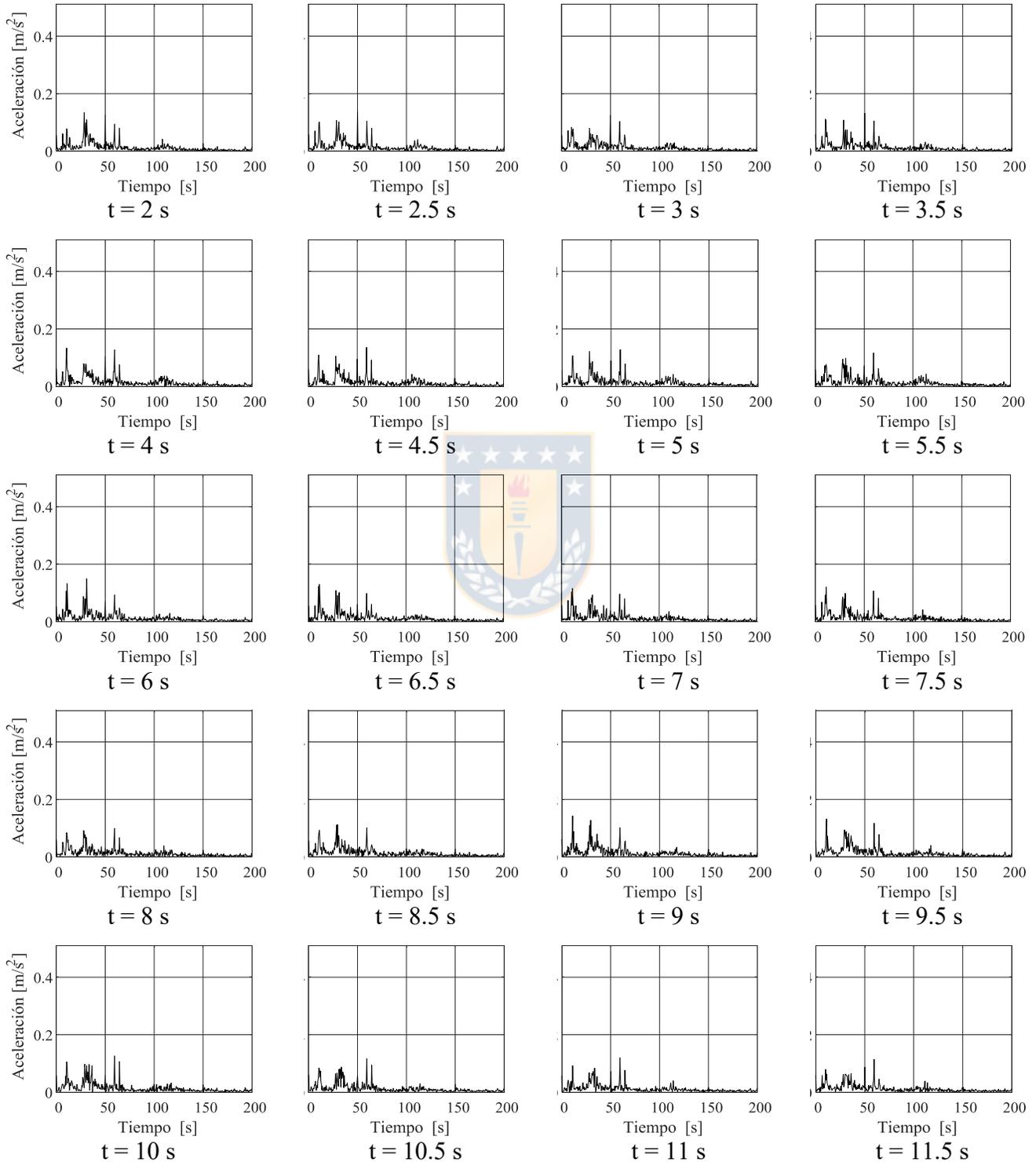


Figura 45. Espectro aceleración en el tiempo para *spray*.

En la Figura 46 se observa la variación del espectro en el tiempo para *semi-roping*.

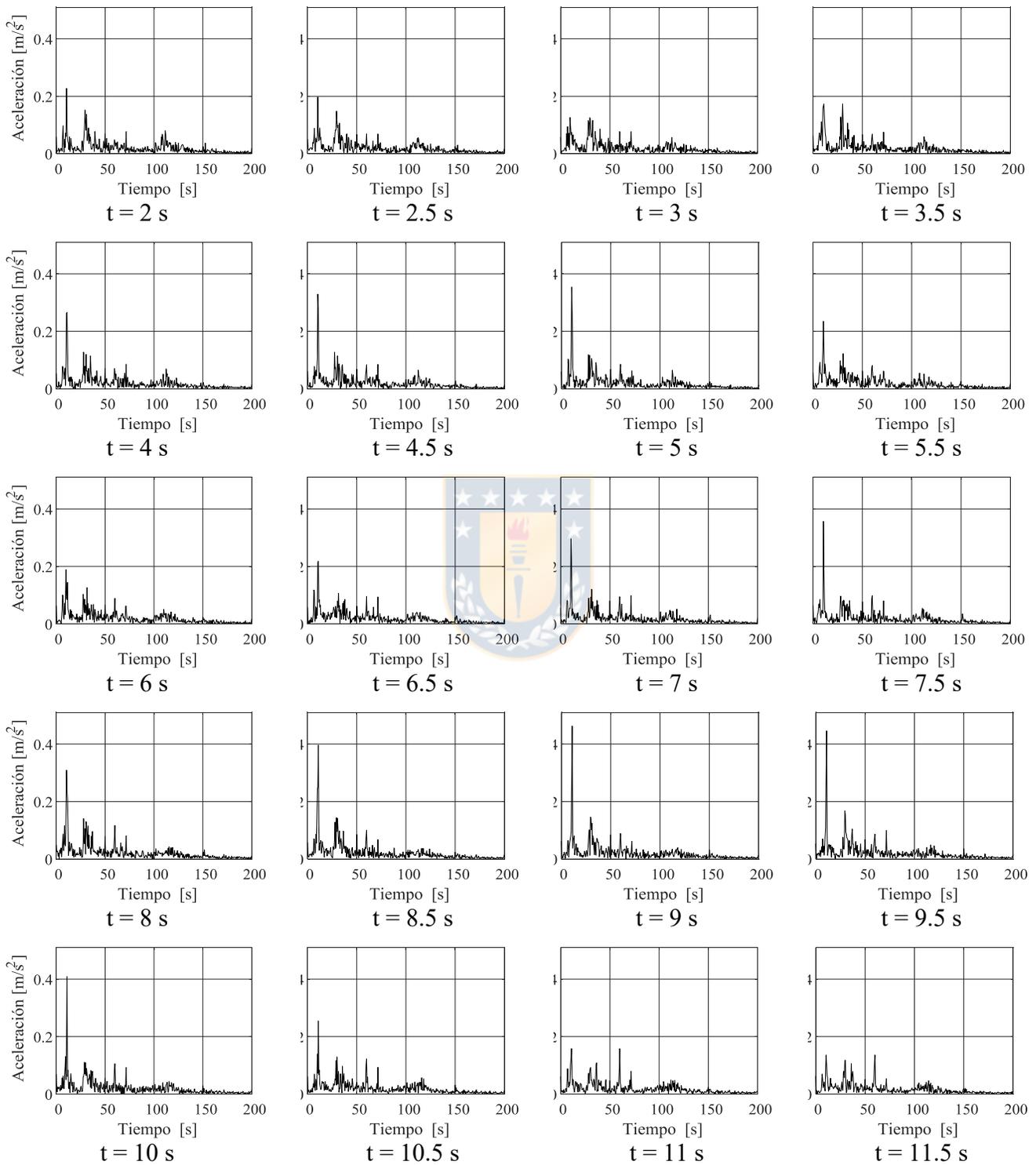


Figura 46. Espectro aceleración en el tiempo para *semi-roping*.

En la Figura 47 se observa la variación del espectro en el tiempo para *roping*.

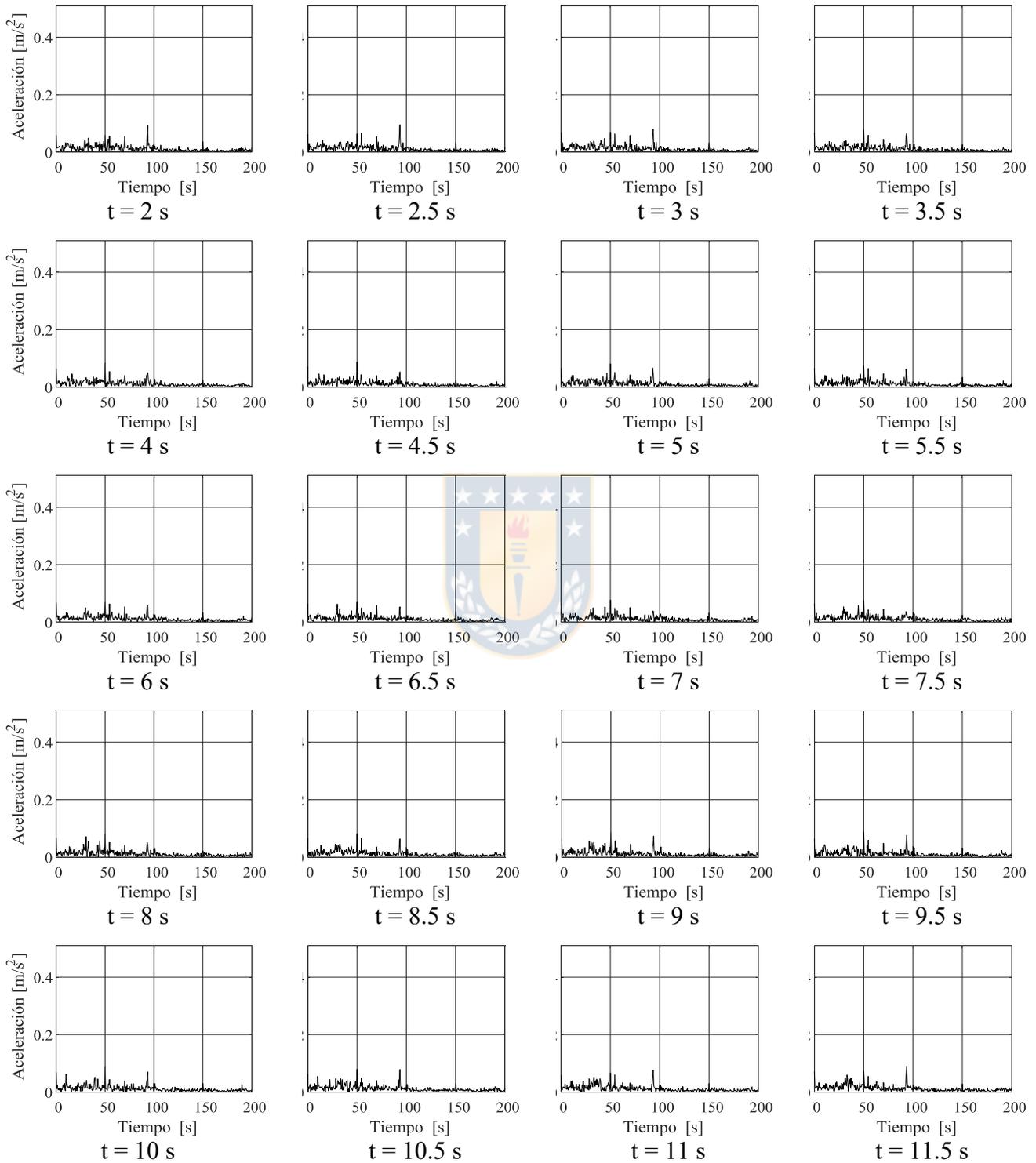


Figura 47. Espectro aceleración en el tiempo para *roping*.

5.2.4. Valor RMS de la vibración en el tiempo.

La Figura 48 muestra la tendencia vibratoria en el tiempo para cada condición de operación.

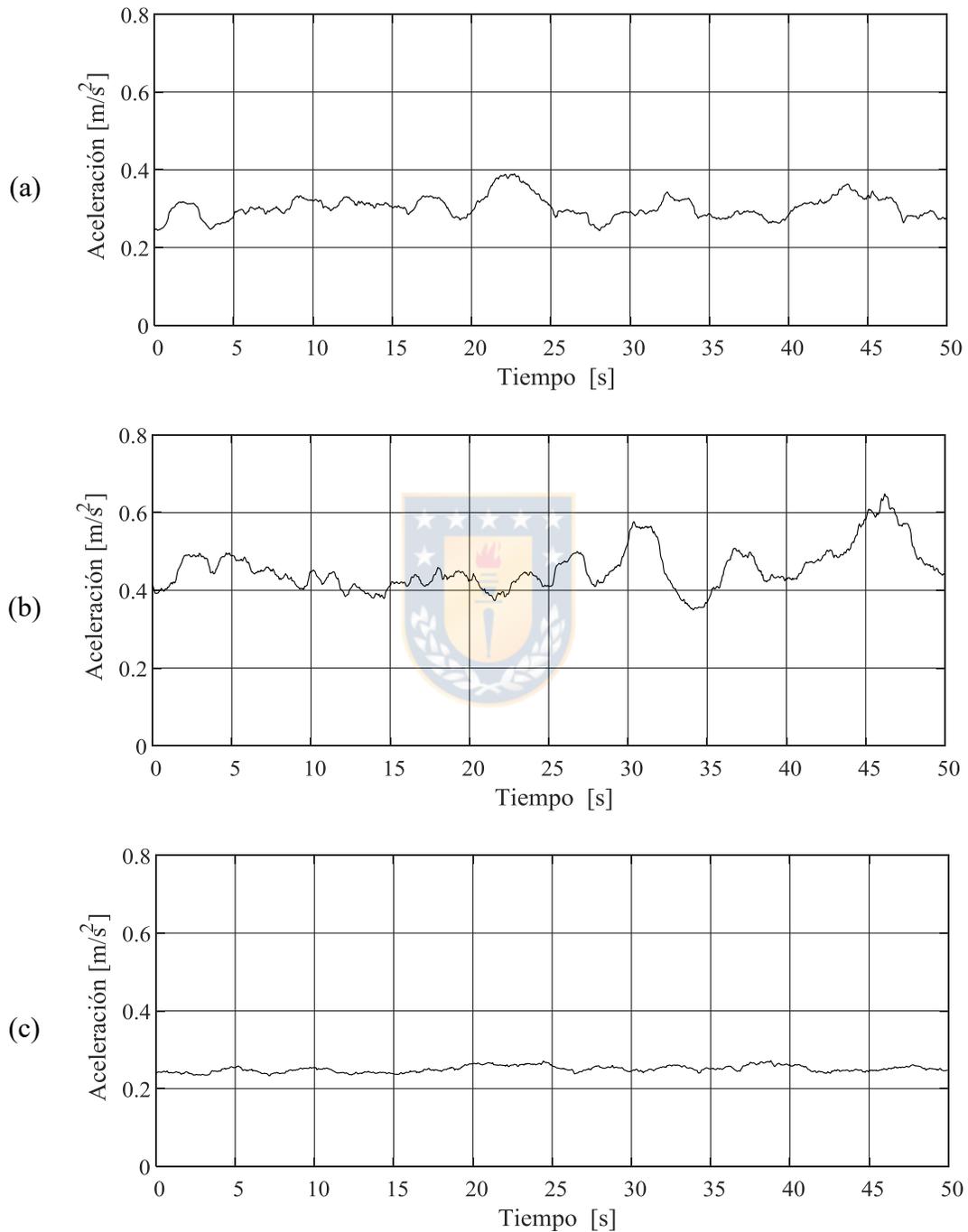


Figura 48. Valor RMS de aceleración en el tiempo para (a) *spray*, (b) *semi-roping*, (c) *roping*.

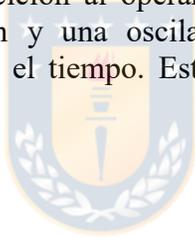
5.3. Análisis de resultados.

En la Figura 43 y 44 se observa que en *spray* existen variaciones no significativas en la amplitud de la forma de onda. Luego, cuando el hidrociclón opera en *semi-roping* se observa un aumento en la amplitud vibratoria caracterizado por una variación de la misma. En *roping* la forma de onda es mucho más plana, incluso más que en *spray*, no se ven grandes oscilaciones y disminuye la amplitud vibratoria.

Al analizar el comportamiento del espectro vibratorio en el tiempo para *spray* (ver Figura 45) se observan pequeñas variaciones en la amplitud en las componentes vibratorias. Luego en la Figura 46 se observa que dichas amplitudes poseen un carácter oscilante en *semi-roping*, aumentando y disminuyendo de forma considerable en el tiempo. Finalmente, en *roping*, dicha oscilación no es observable, comparando con el capítulo anterior, es lógico asumir que si un hidrociclón cambia de estado de operación desde *semi-roping* a *roping* el cambio en las vibraciones no es instantáneo, más bien es progresivo, debido que en el caso anterior se trabajó un *roping* cercano a *semi-roping* manteniendo características similares a este último tipo de operación.

Al comparar las Figuras 45, 46 y 47, se observa una componente cercana a 10 [Hz] que en *spray* oscila en amplitud de forma mínima, luego en *semi-roping* posee mayores variaciones de amplitud, para luego desaparecer en *roping*.

En la Figura 48 se observa que un hidrociclón al operar en *spray*, la transición a *roping* se verá reflejada en un aumento de la vibración y una oscilación de la misma, para luego disminuir notablemente con muy poca variación en el tiempo. Esto es coherente con el análisis del capítulo anterior.



CAPITULO 6

Conclusiones y perspectivas

6.1. Conclusiones.

En este estudio se investigó:

- El impacto de la distribución granulométrica de sólidos dispersos en una mezcla sólido-líquido sobre el *roping* en hidrociclones.
- La relación entre la fuerza generada por el comportamiento del flujo sobre las paredes del hidrociclón y su respectivo estado vibratorio.
- Caracterización de la vibración en la transición desde *spray* a *roping*, y su paso por el *semi-roping*.

Respecto a los objetivos específicos se concluye:

- Se implementó un modelo CFD de un hidrociclón de laboratorio presente en el Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica de Universidad de la Concepción. Se utilizó el software Gambit 2.4.6. para la creación de la geometría y su posterior discretización, mientras que para la modelación se utilizó el código comercial ANSYS Fluent 17.2.
- Se validaron los resultados del modelo numérico mediante la comparación con datos obtenidos de mediciones experimentales realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción.
- Para presiones de alimentación más altas y granulometrías más gruesas, el hidrociclón tiende a operar en *roping*, por lo que existe una relación directa entre el *roping* y el material de trabajo.
- La fuerza producto del flujo está relacionada directamente con el comportamiento vibratorio.
- Las vibraciones en *spray* están caracterizadas por una amplitud media y una baja oscilación en el tiempo, mientras que en *semi-roping* existe mayor amplitud y oscilación, luego, en *roping* prácticamente no existe oscilación y la amplitud vibratoria es menor que en los dos primeros casos.

Para el primer análisis, el hidrociclón seleccionado posee una relación de diámetros de descargas de 0,6 por lo que no debería operar en *roping* bajo ninguna circunstancia. Sin embargo, en los casos 5 y 6, el hidrociclón posee una descarga tipo *rope*. En estos casos, el núcleo de aire se disipa por completo, y el ángulo de descarga es nulo. Además, existe una acumulación excesiva de material en la zona cónica del hidrociclón, lo que es factor en el rompimiento del núcleo de aire, pudiendo en la práctica, tapar por completo el *apex*.

Cuando un hidrociclón operando en *spray* se acerca un estado *roping*, su núcleo de aire se vuelve inestable (ver Figura 18), y considerando además que en *semi-roping* existen variaciones de masa considerables dentro del hidrociclón debido principalmente a la destrucción y posterior restitución de la parte inferior del núcleo de aire, la fuerza que provoca el comportamiento vibratorio del equipo es rotatoria y producida por la variación de masas y rotación del centro de masas inherente al movimiento

del torbellino interior del flujo. Así, cada condición está relacionada al núcleo de aire de la forma en que se explica en la Tabla 16.

Tabla 16. Caracterización vibratoria para cada condición de operación y relación con núcleo de aire.

<i>Spray</i>	Vibración con oscilación mínima provocada principalmente por la rotación del centro de masas del flujo.
<i>Semi-roping</i>	Vibración con mayor oscilación en su amplitud provocada por el aumento y disminución de masa debido al rompimiento y restitución del núcleo de aire. Aumenta la amplitud vibratoria respecto al <i>spray</i> .
<i>Roping</i>	Vibración plana sin oscilación debido a la inexistencia de núcleo de aire, no hay gran variación de los flujos máxicos.

6.2. Perspectivas.

Las perspectivas a considerar a futuro bajo el argumento presentado en esta tesis:

- Realizar medición continua de vibraciones a un hidrociclón de laboratorio y observar lo que sucede con espectro vibratorio y tendencia de valor global.
- Realizar un prototipo de controlador operacional mediante vibraciones.
- Analizar la viabilidad práctica de aplicar un sistema de control operacional automatizado a hidrociclones de la industria, considerando además vibraciones de otros equipos que pudieran intervenir, fluctuaciones en flujos, etc.

REFERENCIAS

- Bustamante, M., (1991)
Effect of the hydrocyclone geometry on normal operation condition.
Ph.D. thesis, M. Sc. Thesis, University of Concepcion.
- Chu, K.W., Wang, B., Yu, B., Vince, A., (2012).
Computational study of the multiphase flow in a dense medium cyclone: Effect of particle density.
Chem. Eng. Sci. 73, 123-139.
- Cokljat, D., Slack, M., Vasquez, S., Bakker, A., Montante, G., (2006).
Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase.
Prog. Comput. Fluid. Dyn. An Int. J. 6, 168.
- Concha, F., Barrientos, A., Montero, J., Sampaio, R., (1996)
Air core and roping in hydrocyclones.
International Journal of Mineral Processing 44-45, 743–749.
- Cullivan, J. C., Williams, R. a., Dyakowski, T., Cross, C. R., (2004).
New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics.
Minerals Engineering 17 (5), 651–660
- Delgadillo, J., Rajamani, R.K., (2005).
A comparatibe study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem.
International Journal of Mineral Processing 77, 217-230.
- Delgadillo, J., Rajamani, R.K., (2007).
Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics.
International Journal of Mineral Processing 84, 252-261.
- Ghodrat, M., Qi, Z., Kuang, S.B., Ji, L., Yu, A.B., (2016).
Computational investigation of the effect of particle density on the multiphase flows and performance of hydrocyclone.
Mineral Engineering 90 (16) 55-69
- Gutierrez, J.A., Dyakowski, T., Beck, M.S., Williams, R.A., (2000).
Using electrical impedance tomography for controlling hydrocyclone underflow discharge.
Powder Technology 108 (2-3), 180-184.
- Huang, S., (2005).
Numerical simulation of oil-water hydrocyclone using reynolds-stress model for eulerian multiphase flows.
The Canadian Journal of Chemical Engineering 83 (5), 829–834.

- Kuang, S. B., Chu, K. W., Yu, A. B., Vince, A., (2012).
Numerical study of liquid-gas-solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration.
Minerals Engineering 31, 17–31.
- Narashimba, M., Brennan, M., Holtham, P.N., (2006).
Large Eddy Simulation of hydrocyclone-prediction of air-core diameter and shape.
International Journal of Mineral Processing 80, 1-14.
- Olson, T.J., Van Ommen, R., (2004).
Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model.
Minerals Engineering 17 (5), 713-720.
- Pérez, D., Cornejo, C., Rodriguez, C.G., Concha, F., (2017).
Roping in hydrocyclones: modeling the multiphase flow.
Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Enviado.
- Reddy, T.V., Rao, V.B., Arugonda, R., Mangadoddy, N. (2016).
Development of novel hydrocyclone designs for improved fines classification using multiphase CFD model.
Separation and Purification Technology 175 (2017) 481-497.
- Rener, V.G., Cohen, H.E., (1978).
Measurement and interpretation of size distribution of particle within a hydrocyclone.
Trans. IMM, Sec C, 87 (Junio), 139.
- Slack, M.D., Prasad, R.O., Bakker, A., Boysan, F., (2000).
Advances in cyclone modeling using unstructured grids.
Che. Eng. Research and Design. 78. 1098-1104.
- Swain, S., Mohanty, S., (2013)
A 3-dimensional Eulerian-Eulerian CFD simulation of a hydrocyclone.
Appl. Math, Model 37, 2921-2932.
- Suasnabar, D.J., (2000).
Dense medium cyclone performance, enhancements via computacional modeling of the physical process.
Ph.D. Thesis, University of New South Wales.
- Van Vuuren, J., M. J., Aldrich, C., Auret, L., (2011).
Detecting changes in the operational states of hydrocyclones.
Minerals Engineering 24 (14), 1532–1544.

Wang, B., Chu, K.W., Yu, B., (2007).

Numerical study of particle-fluid flow in a hydrocyclone.

Industrial & Engineering Chemistry Research 46, 4695–4705.

Wang, B., Chu, K.W., Yu, B., Barnett, G.D., Barnett, P.J., (2011).

Computational study of the multiphase flow and performance of dense medium cyclone: Effect of the body dimensions.

Minerals Engineering 24, 19-34.

Xizhong Chen, Junwu Wang (2014)

A comparison of two-fluid model, dense discrete model and CFD-DEM method for modeling impinging gas-solid flow.

Powder Technology 254, 94-102



BIBLIOGRAFÍA

Heiskanen, K., (1993)
Particle Classification
Chapman and Hall. London. U.K.

Kundu, P.K., Cohen, I.M., (2008)
Fluid Mechanics
4th ed. Oxford

Wills, B.A., Napier-Munn, T.J., (2006)
Mineral Processing Technology
7th ed. Oxford. Elsevier Science & Technology Books

