



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Barrera de Burbujas

Facultad de Ingeniería UDELAR

Proyecto final de carrera de Ingeniería Mecánica

Matías Izquierdo, Renzo Carissimi, Nicolas Sabjan

Tutor: Alejandro Gutiérrez

Cotutora: Elizabeth González

Mayo 2023

Resumen ejecutivo

El presente proyecto consiste en el estudio y desarrollo de un método novedoso para la retención de residuos plásticos en cursos de agua. Dicho método se basa en la generación de una Barrera de Burbujas, a partir de ahora “BdB”, mediante un sistema que destaca por su simpleza. El mismo consiste en un tubo perforado sumergido a través del cual se hace pasar aire comprimido mediante un compresor. Este, que es colocado en el fondo del curso de agua, libera el aire a través de sus orificios, generando las burbujas encargadas de la retención de la basura.

El documento presenta un análisis en detalle del funcionamiento de la tecnología y comparaciones con otras alternativas de uso actual. A los efectos de la descripción de la tecnología, en primer lugar se estudia el comportamiento de las burbujas, tanto como objeto aislado como en conjunto, luego se presentan resultados de ensayos realizados en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de la República, los cuales fueron reportados en artículos científicos estando al momento de la presentación del proyecto a la espera de aprobación.

El primer ensayo se realiza en un canal de vidrio con agua en reposo. Este procura caracterizar la cinemática de la burbuja. Se cuantifica la velocidad de ascenso y geometría de las mismas haciendo uso de una cámara de alta velocidad y herramientas computacionales para el posterior análisis. Adicionalmente con los datos recabados, se calcula un parámetro de interés para el tema del cual no abunda mucha información al respecto, este es el coeficiente de descarga. Este adimensionado caracteriza los orificios de salida del aire, y su conocimiento permite posteriormente hacer cálculos empíricos que ayudan al desarrollo del modelo matemático del sistema.

A su vez, previo a la realización de un modelo a escala, se estudia de forma cualitativa el comportamiento de dos especies acuáticas, las carpas y Corydoras, para verificar la hipótesis de no afectación de la vida acuática por parte de la barrera.

Finalizada la etapa de caracterización de la burbuja, se procede a la realización de un ensayo a pequeña escala en el Canal de Hormigón del IMFIA. Este ensayo permite un mayor acercamiento al funcionamiento del sistema como barrera de residuos sólidos. Se estudian los parámetros de mayor influencia en el funcionamiento del sistema y se evalúa el desempeño de la tecnología en términos de su eficacia como barrera de residuos.

Finalmente, culminado la etapa de ensayos en laboratorio y el análisis de los principios que gobiernan el comportamiento de las burbujas, se evalúa positivamente la efectividad del sistema en la retención de residuos, por lo cual se lleva a cabo un análisis de factibilidad y viabilidad económica y geográfica para la

implementación del sistema en el departamento de Montevideo, Uruguay. Para esto se realiza un dimensionamiento de equipos en base a los conocimientos generados en los ensayos previos y la correspondiente presupuestación. También se lleva a cabo un estudio geográfico de potenciales puntos de aplicación de la tecnología y se contacta a las entidades competentes. Se concluye que a pesar de la necesidad de la ciudad y del potencial de la tecnología, Montevideo no resulta un lugar óptimo para la aplicación de la misma dado que la mayoría de sus cauces de agua no se adaptan a los requerimientos específicos del sistema para su instalación. No obstante, mirando hacia el interior del país existen múltiples cursos de agua que podrían ser estudiados para una posible implementación de este sistema de captación de residuos.

Índice general

1 Motivación	10
2 Introducción	16
2.1 Definición del problema y antecedentes	16
2.2 Tecnología	17
2.3 Objetivo principal	18
2.4 Objetivos específicos	19
2.5 Alcance	19
2.6 Estructura del documento	19
3 Fundamentos	21
3.1 Burbuja individual	21
3.1.1 Formación	21
3.1.2 Volumen	23
3.1.3 Velocidad de ascenso	23
3.2 Barrera de burbujas	25
3.2.1 Clasificación	25
3.2.2 Flujo inducido	25
3.3 Números adimensionados	28
4 Ensayos de caracterización de barrera de burbujas	30
4.1 Objetivo	30
4.2 Descripción del banco de ensayos	30
4.3 Análisis de resultados	35
4.3.1 Velocidad de ascenso de las burbujas.	36
4.3.2 Variación de velocidad en función de la presión	38
4.3.3 Variación de velocidad en función del diámetro de orificios	38
4.3.4 Variación de velocidad en función del espaciamiento entre orificios	38
4.3.5 Caracterización de la forma de malla.	38
4.3.6 Regiones del flujo de burbujas	40
4.4 Ensayo con peces	41
4.5 Comportamiento de "JET"	42
4.6 Conclusiones del primer ensayo, agua en reposo	43
5 Ensayo de prototipo	45

5.1	Objetivo	45
5.2	Descripción del prototipo	46
5.3	Ensayo del prototipo con agua en reposo	46
5.3.1	Objetivos	46
5.3.2	Descripción	47
5.3.3	Análisis de Resultados	47
5.3.4	Conclusiones del ensayo en el canal de vidrio	51
5.4	Ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos variados	51
5.4.1	Objetivo	51
5.4.2	Metodología	51
5.4.3	Descripción	52
5.4.4	Análisis de resultados	55
5.4.5	Conclusiones del ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos variados	61
5.5	Ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades	61
5.5.1	Objetivo	61
5.5.2	Descripción del ensayo	63
5.5.3	Análisis de resultados	64
5.5.4	Conclusiones ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades	69
5.6	Conclusiones generales de los ensayos	69
6	Cursos de agua	70
6.1	Cursos visitados	70
6.2	Requisitos y selección del sitio	73
7	Sitio y Dimensionamiento	78
7.1	Sitio Seleccionado	78
7.1.1	Características geométricas	78
7.1.2	Contexto urbano-ambiental	83
7.2	Dimensionamiento de prototipo	84
7.2.1	Cálculo de caudal de ingreso - Programa en Octave	84
7.2.2	Compresor	87
7.2.3	Instrumentación y sistema de control	90
7.2.4	Sistema de recolección	92
7.2.5	Sistema de anclaje	104
7.2.6	Dimensionado Eléctrico	108
7.2.7	Otros	109
8	Conclusiones	113
A	Calibración del caudalímetro	116
A.1	Descripción del instrumento	116
A.2	Calibración	117
A.3	Descripción del problema presentado y solución	118

B	Reporte de datos: ensayos del prototipo en el canal de hormigón	120
B.1	Ensayo con agua en movimiento y plásticos aleatorios	121
B.2	Ensayo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades	122
C	Sistema alternativo de recolección cinta transportadora	123
C.0.1	Ventajas y desventajas de los sistemas de recolección considerados	125
D	Influencia de los plásticos sobre la fauna acuática	127
E	Código de cálculo de caudal en Octave	129
F	Modelo formación y desarrollo de una burbuja	131
G	Compresores	133
H	Selección de columna	134
I	Planos	136
J	Eléctrica	140
K	Alternativas de control	145

Índice de figuras

1.1	Evolución de la producción y acumulación de plásticos en las últimas décadas. Fuente: [Ritchie and Roser, 2018].	10
1.2	Porcentaje de población en zonas urbanas. Fuente [Pereira, 2018]	11
1.3	Ave con residuos plásticos encontrada en la playa Mansa de Punta Colorada. Foto: Vicki Crook	12
1.4	Evolución de los plásticos en el océano	12
1.5	Barreras de burbujas colocadas por el grupo holandés TGGB en Holanda	13
1.6	Derrame de petróleo contenido con barrera por el grupo canadiense Bubble Tubing	14
2.1	Playa Capurro Montevideo, Uruguay	17
2.2	Esquema de la tecnología	18
3.1	Etapas de la formación de una burbuja. Imagen tomada de [Gnyloskurenko et al., 2003].	22
3.2	Regiones y origen analítico. Fuente: [Mascha and Christensen, 1983].	25
3.3	Campo de velocidades cercanas a una barrera de burbujas según Cederwall and Ditmars (1970)	26
3.4	Valores de K bajo distintas condiciones de laboratorio. Tabla extraída de [Lo, 1991].	27
3.5	Medidas de corriente superficial bajo distintas condiciones. Imagen obtenida de [Lo, 1991]	28
3.6	Forma aproximada de una barrera de burbujas en agua en movimiento. Imagen obtenida de [Mascha and Christensen, 1983]	28
3.7	Números adimensionados. Fuente [Tomiyaama, 2002].	29
4.1	Dispositivo en L	31
4.2	Diagrama de banco de ensayo	31
4.3	Diagrama de banco de ensayo, indicando disposición de luces y cámara.	32
4.4	Banco de ensayo, proceso de registro de cuadrículado.	33
4.5	Configuración de 1 mm de diámetro de orificio y 38 mm de espaciamiento para presiones de 0,15; 0,35; 0,50 y 0,75 bar respectivamente	34
4.6	Configuración de 1 mm de diámetro de orificio y 75 mm de espaciamiento para presiones de 0,15; 0,35; 0,5 y 0,75 bar respectivamente	34
4.7	Configuración de 2 mm de diámetro de orificio y 75 mm de espaciamiento para presiones de 0,15; 0,5 y 0,75 bar respectivamente	35
4.8	Velocidad de ascenso de burbujas en función de la posición vertical para las distintas configuraciones ensayadas para 1 mm de diámetros de orificios en tubo en L.	37
4.9	Zonas DMB	39
4.10	DMB para orificios de 1 mm	39

4.11	Definición de región inicial, región de flujo estable y origen analítico para el dispositivo ensayado.	41
4.12	Ensayo de comportamiento de peces frente a la BdB	42
4.13	Comportamiento de Jet	43
5.1	Tubo perforado	46
5.2	Banco de ensayos tubo PVC flexible con agua en reposo	47
5.3	Velocidades de ascenso en función de P	48
5.4	Velocidad de ascenso en función de altura	49
5.5	Zonas densidad de barrera	50
5.6	Densidad de malla de burbujas	50
5.7	Canal de hormigón para ensayo del prototipo	53
5.8	Diagrama del banco de ensayos.	53
5.9	Residuos utilizados durante el ensayo	54
5.10	Porcentaje de plásticos retenidos en función de la presión de aire inyectada para las distintas condiciones de trabajo. Datos relevados en el Canal de Hormigón del IMFIA.	55
5.11	Condiciones de trabajo.	55
5.12	Presión 65mbar, caudal de agua 93,5L/s	57
5.13	Presión 80 mbar, caudal de agua 63,8L/s	58
5.14	Presión 80 mbar, caudal de agua 117L/s	59
5.15	Presión 100 mbar, caudal de agua 93,5L/s	60
5.16	Canal con sólidos esféricos de distinta densidad	62
5.17	Sólidos esféricos de distinta densidad. Se tienen tres fluidos de relleno: agua (H ₂ O), aire (A) y salmuera (S).	63
5.18	Canal de hormigón con residuos uniformes de distinta densidad	64
5.19	Plásticos de distinta densidad retenidos.	65
5.20	Plásticos que superan la barrera, distinta densidad.	65
5.21	Presión 150 mbar, caudal de agua 146 L/s.	67
6.1	Mapa de Montevideo con las ubicaciones de los puntos visitados.	71
6.2	Imágenes de algunos de los cursos de agua evaluados	72
6.3	Entorno del Arroyo Chacarita	73
6.4	Arroyo Chacarita)	74
6.5	Arroyo Pantanoso (izq.) y Arroyo del Molino (der.)	74
6.6	Arroyo St. Brendans	75
6.7	Márgenes del Arroyo Carrasco (izq.) y Arroyo del Molino (der.)	75
6.8	Procedimiento de medida con correntómetro.	76
6.9	Arroyo Miguelete (izq.) y Arroyo Pantanoso (der.)	76
6.10	Arroyo Miguelete, sitio seleccionado.	77
7.1	Arroyo Miguelete	78
7.2	Sección transversal del arroyo en el sitio seleccionado, escala 1H:10V.	79
7.3	Arroyo Miguelete	80
7.4	Sección transversal del Arroyo Miguelete en la zona seleccionada.	81

7.5	Esquema cenital del Arroyo Miguelete en la zona seleccionada.	82
7.6	Zonas muertas en una contracción. Imagen obtenida de [Jaurena et al., 2018a]	83
7.7	Diagrama de iteración del código en Octave.	86
7.8	Resultados obtenidos del programa.	87
7.9	Soplante Atlas Copco, modelo ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6 Y. Fuente: Catálogo proporcionado por el proveedor.	88
7.10	Diagrama P&ID del sistema BdB con el método de regulación propuesto.	91
7.11	Corte (abajo) y planta (arriba) del sistema de recolección.	94
7.12	Esquema tridimensional del sistema de recolección.	95
7.13	Diagrama de fuerzas de la jaula, vista cenital.	97
7.14	Modelo tridimensional de la grúa de recolección.	99
7.15	Diagrama cuerpo libre, directa y flector de la viga.	100
7.16	Sección mas comprometida de la viga.	100
7.17	Diagrama cuerpo libre, directa y flector de la columna.	101
7.18	Sección mas comprometida de la columna.	101
7.19	Verificación de articulación mediante programa Inventor.	103
7.20	Esquema del sistema de anclaje.	104
7.21	Diagrama de cuerpo libro del tubo.	105
7.22	DCL muerto de anclaje.	106
7.23	Diagrama unifilar.	109
A.1	Turbina del caudalímetro	116
A.2	Banco de calibración para el caudalímetro	117
A.3	Curva de calibración	118
A.4	Enderezador de flujo	119
D.1	Resumen de estudios y artículos respecto a la influencia generada por la presencia de plásticos en el medio acuático en distintas especies animales. Fuente: [Law, 2017].	128
F.1	Balance de fuerzas en la formación de una burbuja. Imagen extraída y modificada de [Kulkarni and Joshi, 2005].	132
G.1	Comparación compresores: características generales.	133
G.2	Comparación compresores: costo.	133
H.1	Tabla de selección de columna.	134
H.2	Planilla de cálculo del método de Sulzberguer.	135
J.1	Cálculos de las corrientes de cortocircuitos.	141
J.2	Zonas tiempo-corriente para corrientes alternas (15 a 100Hz)	144
K.1	Diagrama PID del sistema BdB con el método de regulación alternativo.	145

Índice de cuadros

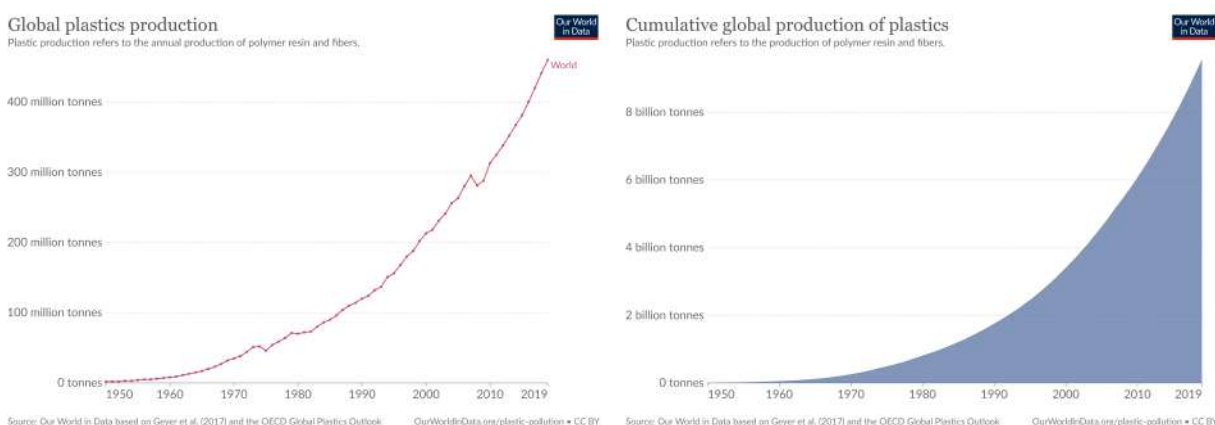
5.1	Resultados de coeficiente de descarga	68
7.1	Tabla tirante Miguelete	79
7.2	Cuantificación de residuos en el drenaje urbano por escurrimiento superficial. Fuente: [Pereira, 2018]	83
7.3	Presupuesto general.	110
7.4	Presupuesto - Barrera.	111
7.5	Presupuesto - Grúa.	111
7.6	Presupuesto - jaula.	111
7.7	Presupuesto - Sistema de control.	111
7.8	Presupuesto - Mano de obra y traslados.	112
7.9	Presupuesto - Materiales eléctricos.	112
7.10	Presupuesto - Otros.	112
B.1	Resultados del ensayo con agua en movimiento y plásticos aleatorios	121
B.2	Resultados del ensayo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades.	122
J.1	Corrientes cortocircuito CC Aislamiento XLPE.	140
J.2	Poder de corte y Clase de limitaciones de energía.	141
J.3	Poder de corte y Clase de limitaciones de energía.	142
J.4	Verificación sección cables por caída de tensión y corriente admisible.	143
J.5	Sección de conductor de cable a tierra	144

Capítulo 1

Motivación

El plástico es un material muy versátil, práctico y con costo de producción reducido, por lo cual en la sociedad moderna se utiliza masivamente. Sin embargo, dada su composición química estos se degradan muy lentamente por lo que billones de toneladas se han acumulado en los últimos años [Rhodes, 2018].

La cantidad de residuos sólidos que circulan en los cursos de agua, con el plástico como protagonista, ha estado en constante aumento en los últimos años, y la tendencia indica que seguirá aumentando. En el artículo publicado por Our World in Data [Ritchie and Roser, 2018] se muestra la evolución de los plásticos producidos (figura 1.1a) y su acumulación en las ultimas décadas (figura 1.1b). Se observa que para 2019 ya se producían más de 400 millones de toneladas, mientras que el valor acumulado superaba las 8 billones de toneladas. De los plásticos generados entre los años 1950 y 2015 solo el 9 % fue reciclado, el 12 % fue incinerado y el resto se divide entre basurales o entornos naturales, entre los cuales se encuentran los océanos [Rhodes, 2018]. Se estima que en 2010 alrededor de nueve millones de toneladas de plásticos ingresaron a los océanos.



(a) Producción

(b) Acumulación

Figura 1.1: Evolución de la producción y acumulación de plásticos en las últimas décadas. Fuente: [Ritchie and Roser, 2018].

Uno de los principales motivos por los cuales los plásticos acaban en los océanos se debe al crecimiento demográfico y al desarrollo urbano [Pereira, 2018]. En general los países sudamericanos presentan un fuerte crecimiento de la población en zonas urbanas y desde el año 1950 que Uruguay se encuentra a la cabeza en lo que respecta al porcentaje de habitantes viviendo en zonas urbanas con una tendencia a seguir creciendo en los años por venir como data la figura 1.2.

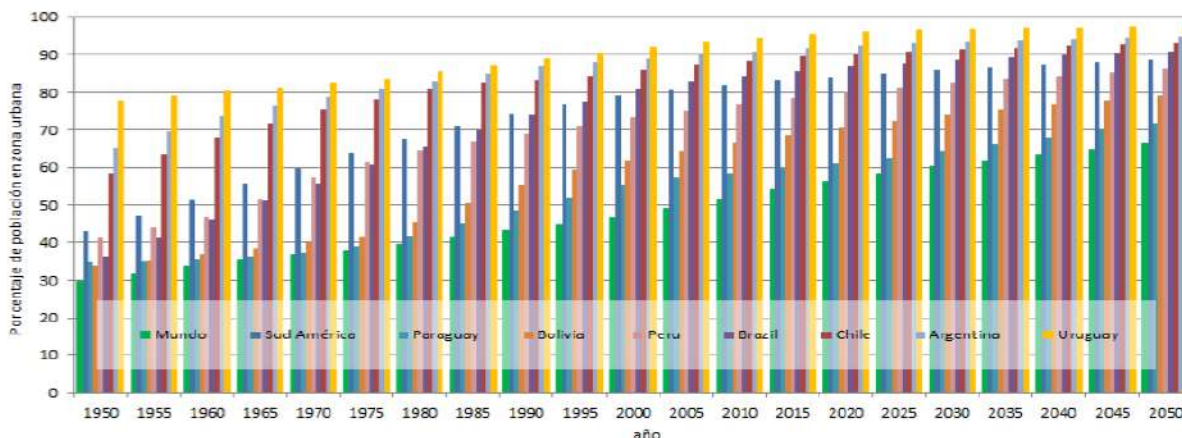


Figura 1.2: Porcentaje de población en zonas urbanas. Fuente [Pereira, 2018]

Tanto los plásticos como los microplásticos¹ tienen un efecto nocivo en la salud de la fauna marina. Diversos estudios han demostrado que la ingesta de plásticos genera en esta la obstrucción física del sistema digestivo, lo que provoca en el animal una sensación de saciedad que puede llevar a la posterior muerte por inanición. Esto impacta en la homeostasis ecológica, ya que puede llevar a la extinción de especies marinas, desequilibrando el ecosistema. A su vez, debido a que el ser humano se encuentra en el último eslabón de la cadena trófica, termina viéndose perjudicado [Prata et al., 2020]; en los últimos años se ha constatado la presencia de microplásticos en humanos que incluían pescado o mariscos en su dieta [Ritchie and Roser, 2018], [Naidoo et al., 2020]. Aun así este no es el único problema ocasionado por la presencia de plásticos en las grandes masas de agua, algunos de estos son: daños cutáneos ocasionados por verse atrapados con algún cuerpo plástico, daños a nivel bioquímico y celular también ocasionado por la ingesta entre otros como puede verse en la tabla del anexo D, extraída del trabajo realizado por [Law, 2017].

¹Los microplásticos son un tipo particular de plásticos y se definen como aquellos con un tamaño menor a 5 mm [Rochman C. M. Browne M. A. Underwood A. J. van Franeker J. A. Thompson R. C. & Amaral-Zettler, 2016]. Pueden entrar al ambiente directamente con un tamaño menor a los 5 mm (microplásticos primarios) o formarse como consecuencia de la degradación de plásticos de mayor tamaño.



Figura 1.3: Ave con residuos plásticos encontrada en la playa Mansa de Punta Colorada. Foto: Vicki Crook

Es claro entonces que tarde o temprano los contaminantes que culminan en el mar afectan de una forma u otra a la gran mayoría de especies marinas y al propio ser humano. Adicionalmente, que los residuos sólidos acaben en el océano dificulta aún más su recolección, volviéndose imposible en algunos casos. Por esto resulta esencial realizar dicha recolección en los cursos de agua previo a su desembocadura en el océano. En la actualidad existen distintos métodos para conseguirlo, tales como filtros en los desagües urbanos, barreras de contención flotantes, barcos reja, rejas o pantallas, y separadores hidrodinámicos, entre otros. Estas opciones resultan muy útiles, aunque insuficientes, ya que las ventajas que presentan unos, otros las tienen como desventajas, y viceversa [Helinski et al., 2021]. Además, generalmente los métodos tradicionales no logran la retención de microplásticos, a excepción de algunas rejas o pantallas especiales, con luces menores a los 5 mm, que sin embargo perturban la vida acuática, restringiendo la movilidad de las especies e imposibilitando ciertas actividades humanas, como el transporte, el comercio o el deporte.

A continuación se presentan gráficos de Our World in Data [Ritchie and Roser, 2018] que muestran la cantidad de plásticos presentes en los océanos en los últimos años y la proyección de su evolución hasta el año 2050.

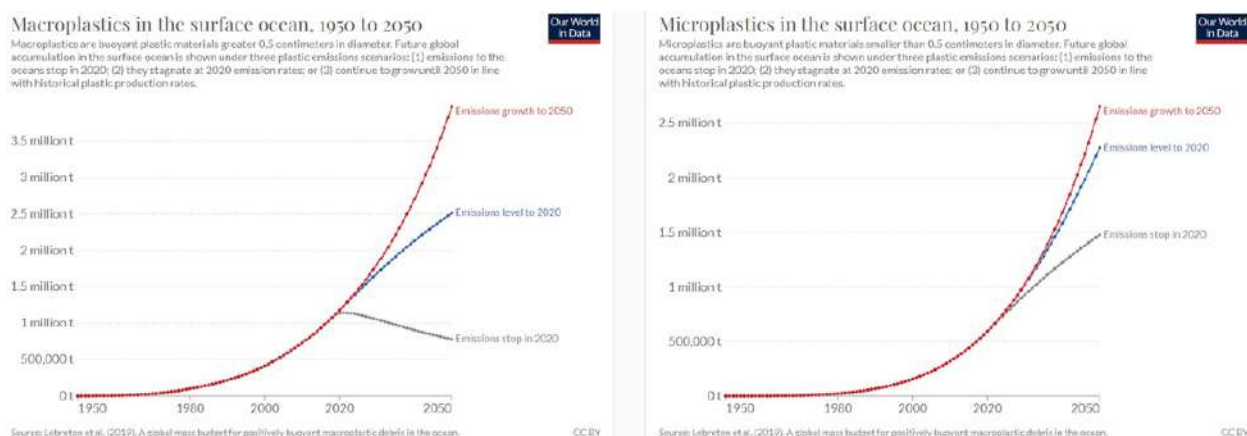


Figura 1.4: Evolución de los plásticos en el océano

En respuesta a esta problemática, en el año 2017 un grupo holandés llamado "The Great Bubble Barrier" (TGGB) [Eveleens et al., 2021] comenzó a impulsar un ingenioso sistema para la retención de residuos en cursos de agua. Si bien la tecnología no es originaria de este grupo, sí lo es la aplicación en la retención de residuos sólidos. Esta tecnología busca detener los desechos en cursos de agua antes de su desembocadura en aguas abiertas, anticipándose a su esparcimiento y evitando que la solución al problema se torne aún más difícil. De hecho, recientemente en [Zhang et al., 2022] se evaluó en qué medida la barrera de burbujas (BdB) es capaz de retener plásticos bajo condiciones de laboratorio. Los resultados obtenidos constatan una gran capacidad para retener sólidos de gran tamaño e inclusive microplásticos. Además, en [Helinski et al., 2021] se realiza una comparación entre 40 métodos de recolección distintos, desarrollados en los últimos años, donde la barrera de burbujas clasifica como uno de los más económicos ubicándose dentro de la categoría "low cost" ($< USD\$10,000$).



Figura 1.5: Barreras de burbujas colocadas por el grupo holandés TGGB en Holanda

Se estima que la cantidad de plásticos y microplásticos presentes en la superficie del océano superará las 3,5 y 2,5 millones de toneladas respectivamente en 2050 [Ritchie and Roser, 2018]. En la actualidad, Uruguay se encuentra dentro de los diez países que más residuos de plástico generan *per cápita*, con un promedio que ronda los 0,25 kg/persona/día [Limongi, 2022]. A este ritmo, es inevitable que de forma directa o indirecta gran parte de estos residuos terminen en los ríos y arroyos que atraviesan ciudades del país. He aquí, entonces, la razón fundamental y principal motivación para investigar la aplicabilidad de esta tecnología en el país.

En lo relativo a las fuentes indirectas de microplásticos según estudios realizados por MVOTMA y la DINAMA el Río de la Plata y su frente marítimo reciben potencialmente unas 26.500 toneladas de plásticos de "un solo uso". El ciclo de vida de estos productos es de solamente un año, lo que agudiza aún más la potencial contaminación por estos plásticos. Según estimaciones basadas en estudios de laboratorio, tan solo los plásticos de un solo uso pertenecientes al sector de embalaje podrían aportar unas 8000 millones de partículas de microplásticos anuales. En cuanto a las fuentes directas de generación de microplásticos, se generan anualmente en Uruguay unas 2.600 Ton. Estos tienen mayor probabilidad de llegar al Río de la Plata debido a que los sistemas de saneamiento con los que cuenta el país en la actualidad no tienen la capacidad de retener partículas de tamaños tan pequeños. De todas maneras en el trabajo se menciona que con la información disponible no es posible estimar qué porcentaje llega al Río de la Plata.

Otras aplicaciones

Una de las primeras aplicaciones de sistemas de burbujas data de los años 30 del siglo XX. El incremento del transporte de petróleo por vía marítima de la época llevó a un aumento del número de derrames accidentales. Consecuentemente, las primeras barreras de burbujas fueron desarrolladas con el fin de detener el avance de estos derrames. Solo debía colocarse el tubo en el agua y abrirse una válvula para que el sistema comenzara a funcionar, lográndose detener al avance del petróleo en el agua gracias a la barrera de burbujas, permitiendo de esa manera su posterior extracción.



Figura 1.6: Derrame de petróleo contenido con barrera por el grupo canadiense Bubble Tubing

También se han utilizado sistemas de burbujas con otros fines, entre estos se encuentra la mezcla forzada de aguas en lagos y estanques con el fin de evitar la formación de hielo. Este método se utiliza en distintas industrias como pueden ser minas, plantas nucleares, plantas de procesamiento de alimentos entre otras [Tubing, 2003]. También pueden encontrarse otras aplicaciones como el control de bancos de arena en estuarios y puertos, la amortiguación de olas, evitar ingresos indeseados de corrientes de agua salada o especies acuáticas (tanto peces y agua vivas como algas).

Se han realizado distintos estudios respecto a la funcionalidad de las BdB como dispositivos selectivos en términos de pasaje de ciertas especies de peces. Este propósito se logra tanto por sus características de barrera física como por sus emisiones acústicas, y dota a la tecnología de una cierta versatilidad en su aplicación [Zielinski et al., 2011]; [Patrick et al., 1985]; [Dawson et al., 2006]. Por lo tanto, con el diseño adecuado este sistema puede interferir o no en el pasaje de peces, manteniendo la fauna inalterada si así se requiere. Esto resulta sumamente importante al buscar una alternativa eficaz y al mismo tiempo medioambientalmente responsable, como es el caso.

Hoy en día, la aplicación industrial más conocida de las burbujas de aire se da en los sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) para el tratamiento de aguas residuales. Fundamentados en el principio de

flotación, estos sistemas, a través de equipos que se encargan de la separación de partículas, logran la eliminación de más del 90 % de sólidos, aceites, grasas y materia orgánica asociada disuelta en las aguas residuales. Además, contribuyen con la oxigenación del agua, disminuyendo sustancialmente la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO). [Teamconcept, 2021]

Aunque con un fin diferente, la BdB como barrera retenedora de residuos comparte sus mecanismos de funcionamiento con los sistemas mencionados previamente. La base en el principio de flotación y el aporte para la mejora del DQO y del DBO, por ejemplo, son consecuencia del funcionamiento de la barrera. Se destaca la simpleza del sistema, que presenta varias ventajas frente a los métodos tradicionales. A diferencia de los sistemas mecánicos (caso de una reja o red física, por ejemplo), no provoca colapsos periódicos por acumulación. Adicionalmente, no interfiere en la actividad humana, permitiendo el tránsito de las embarcaciones, y es capaz de detener microplásticos, una ventaja no menor dada la incapacidad de otros métodos para lograr este objetivo. Como se menciona en párrafos anteriores, si se logra un diseño adecuado este sistema no interferiría en el pasaje de peces, manteniendo la vida acuática inalterada.

Capítulo 2

Introducción

2.1. Definición del problema y antecedentes

La finalidad de este proyecto se fundamenta en la necesidad mundial de reducir la cantidad de contaminantes sólidos que llegan a los océanos. Actualmente Uruguay se encuentra dentro de los principales consumidores de plástico por habitante, por lo que la idea surge de la voluntad de colaborar con la limpieza de los cursos de agua en el país, particularmente en la ciudad de Montevideo.

En el año 2022, la bióloga Marina Vicki Crook publicó un informe en el artículo *"Diagnóstico de estado de situación a nivel nacional sobre la contaminación marina por microplásticos"* a partir de los residuos recolectados en una superficie de 4000 metros cuadrados de la Playa Mansa de Punta Colorada. En este estudio se clasifican todos los residuos capturados, contabilizando particularmente la cantidad de plásticos recolectados, los cuales ascienden a un 91 % del total de los residuos capturados, a diferencia de 20 años antes donde los plásticos representaron un 56 % de la totalidad. Este estudio refleja la cantidad alarmante de residuos plásticos que llegan a la costa desde el océano, contaminando algunas de las playas más populares de la región.

Sumado a esto, [Limongi, 2022] indica que en la actualidad Uruguay es responsable del 0,07 % del total de los residuos plásticos de origen terrestre que llegan a los océanos cada año, por lo que queda en evidencia la necesidad de tomar acción para detener estos residuos antes de su llegada al mar.

Se muestra a continuación el estado actual de algunas de las playas de la ciudad de Montevideo.



Figura 2.1: Playa Capurro Montevideo, Uruguay

Como se menciona en la motivación, esta idea surge del grupo holandés *The Great Bubble Barrier* que fue fundado en 2017 por cuatro jóvenes: Anne Marieke Eveleens, Saskia Studer, Philip Ehrhorn y Francis Zoet. Su idea ganó el primer premio en el Desafío Verde, de Postcode Loterij, en el año 2018, y en el concurso Plastic Free Rivers Makathon, organizado por Rijkswaterstaat y PWN. En 2022 fueron finalistas del “Earthshot Prize”, concurso creado por el príncipe William de Inglaterra. Este concurso se realiza anualmente y puede participar cualquier individuo, equipo, organización o gobierno con soluciones ambientales viables. Cada año hay 5 ganadores, uno por cada categoría: proteger y restaurar la naturaleza, limpiar el aire, revivir los océanos, crear un mundo sin desperdicios y reparar el clima; y a cada ganador se le otorga un premio de 1 millón de libras para continuar con su proyecto.

La primera barrera de burbujas implementada con el propósito de retener plásticos fue colocada en Westerdok, Amsterdam, por el grupo TGBB en el año 2019, [The great bubble barrier, 2016]. El grupo declara, basados en los resultados del piloto, llevado a cabo en el instituto de investigación Deltares, que el sistema propuesto logra detener entre el 70-80 % del plástico flotante y el 50 % del plástico subacuático. Durante las pruebas realizadas en el IJssel, se analizó cómo estos resultados se traducen en un río. Se prueba la Barrera de Burbujas en varias condiciones climáticas y se llega a la conclusión de que se captura el 86 % del material de prueba. Además, el grupo declara lograr retener plásticos de entre 20 micrómetros y 500 micrómetros. Con el sistema de barrera colocado en Amsterdam se logra recolectar 85 kg de basura al mes, lo que representa aproximadamente 8000 piezas de materiales inorgánicos. De este modo, con la colocación de una barrera de burbujas TGBB logra reducir de manera sustancial los residuos que culminan los océanos.

2.2. Tecnología

El sistema consiste en la generación de una cortina de burbujas de aire que funciona como barrera para obstaculizar el pasaje de la basura. La generación de dicha barrera se logra a partir de la inyección de aire a presión en un tubo con orificios mediante un compresor. Este tubo, que se sitúa en el fondo del curso de

agua, se orienta en sentido transversal a la corriente, con cierto ángulo de incidencia respecto a la dirección del flujo. Esta inclinación tiene el objetivo de redirigir los sólidos hacia uno de los márgenes del cauce, donde a través de un dispositivo se recolectarán para su posterior clasificación y reciclaje. Cabe destacar que, además de la deflexión que provocan en los residuos que llegan flotando, las propias burbujas tienen la capacidad de elevar la basura que se encuentra sumergida.

A continuación se presenta un esquema que ilustra lo descrito 2.2.

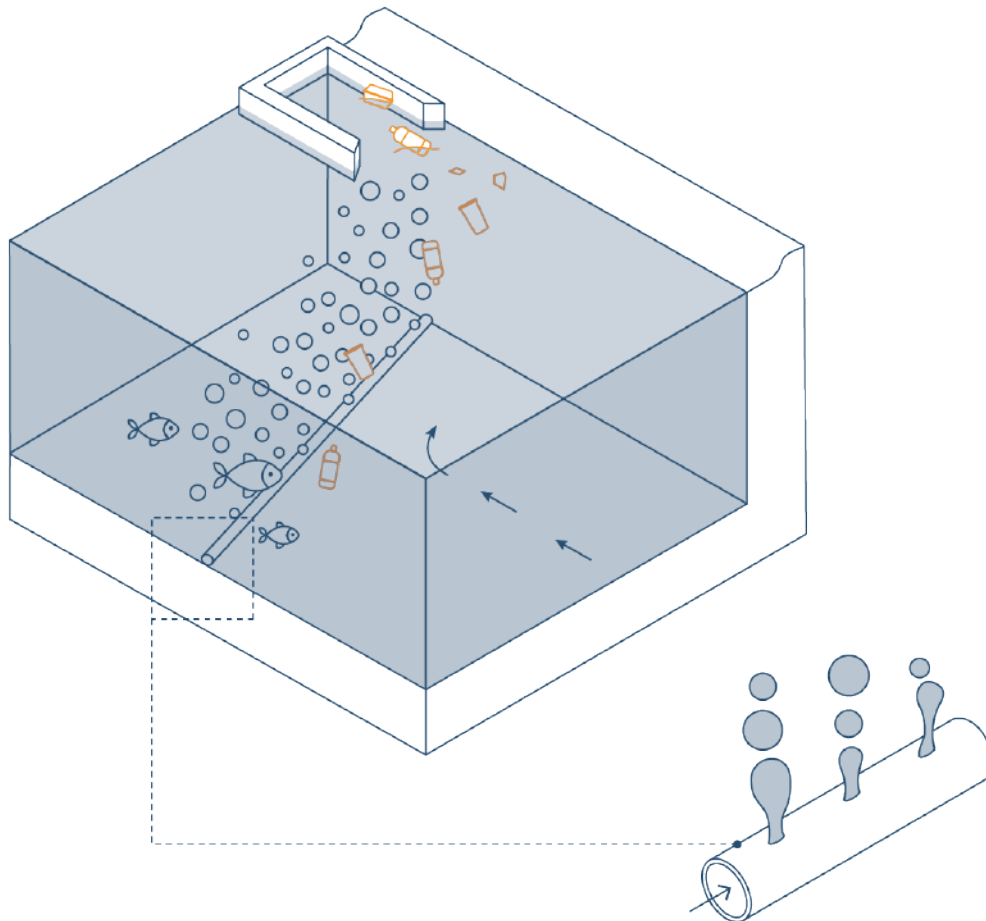


Figura 2.2: Esquema de la tecnología

2.3. Objetivo principal

La finalidad de este proyecto es analizar y desarrollar un sistema de BdB para la retención de residuos en cursos de agua. Se plantea caracterizar el funcionamiento de la barrera a modo de poder dimensionar un sistema para una situación específica.

2.4. Objetivos específicos

1. Ensayar un sistema BdB, en canal de vidrio, con agua en reposo.
2. Ensayar un prototipo BdB, en laboratorio, con agua en movimiento y partículas en suspensión.
3. Releva los cursos de agua en contexto urbano de la ciudad de Montevideo. Evaluar las características más importantes para la aplicación del sistema y seleccionar un sitio para la implementación del sistema.
4. Diseñar una BdB para el sitio seleccionado.
5. Diseñar un sistema recolector de residuos para el sitio seleccionado.

2.5. Alcance

El proyecto comprende el desarrollo de un sistema singular de retención de basura y la evaluación de su aplicabilidad en cursos de agua de la ciudad de Montevideo, Uruguay, con su correspondiente presupuestación. También contempla la realización de ensayos prototípicos para determinar experimentalmente su efectividad y el diseño de un sistema de recolección de residuos que se acopla con el sistema de retención.

2.6. Estructura del documento

En el capítulo 3 se presentan los fundamentos teóricos del proyecto. Primero se realiza una descripción de la burbuja como elemento individual y luego se desarrolla su comportamiento en conjunto con otras burbujas. Dado que la teoría de las burbujas es un campo muy amplio y aún por explorar, este capítulo está enfocado en lo que resulta más importante para la aplicación de barreras de burbujas para retención de sólidos.

Luego, en el capítulo 4 se describe el primer ensayo realizado. Se realiza en el canal de vidrio, con agua estanca y se analizan las imágenes registradas con una cámara de alta velocidad. Además, se realiza un experimento incluyendo peces en el que se analiza cualitativamente la sinergia de estos con la barrera.

El capítulo 5 presenta el segundo ensayo realizado. Este consta de tres etapas: primero se realiza un nuevo ensayo en el canal de vidrio, con agua estanca y análisis de imágenes registradas con la cámara de alta velocidad; luego se ensayan las mismas condiciones en el canal de hormigón, esta vez con flujo de agua y se arrojan elementos plásticos de manera controlada para evaluar la efectividad del sistema. Por último se utilizan sólidos de una igual geometría pero distintas densidades con el objetivo de determinar cómo la densidad de los residuos impacta en cuanto a la capacidad de retención de la barrera.

En el capítulo 6 se describen los distintos cursos de agua evaluados en Montevideo para el desarrollo del prototipo.

El capítulo 7 comienza con la elección del curso para la realización de un prototipo. Luego se presenta el detalle del prototipo diseñado. Se presentan alternativas de diseño, se presupuesta y se evalúa su viabilidad.

Finalmente, en el capítulo 8 se encuentran las conclusiones generales del proyecto.

Capítulo 3

Fundamentos

Las burbujas, tanto en forma individual como en configuraciones en las que se tiene un conjunto de burbujas, han sido analizadas por diferentes autores y existen distintos modelos que describen su comportamiento. En este capítulo se realiza una descripción de los fenómenos que resultan de mayor interés para el desarrollo de la barrera de burbujas, en forma de recopilación de diversos estudios. En particular, se pone énfasis en la formación de las burbujas y en el flujo que estas inducen en el agua que las rodea durante su ascenso.

3.1. Burbuja individual

3.1.1. Formación

Las burbujas pueden surgir de distintas formas, en este caso se estudia la burbuja que se forma a partir de la inyección de aire a presión en el seno de un fluido viscoso (agua) y aquellas que se originan a raíz de la fragmentación de burbujas de mayor tamaño. Otras formas pueden ser la despresurización del gas de una solución o descomposición de un líquido [Mendoza, 2008].

Al generar un flujo continuo de aire, a través de un orificio sumergido en un cuerpo de agua, este se subdivide en varias burbujas de distintos tamaños, lo que conlleva a una gran área de contacto entre fluidos y por ende un gran intercambio de energía y/o masa [Mascha and Christensen, 1983].

En [Gnyloskurenko et al., 2003] se estudia el proceso de formación de burbujas. Allí se lo clasifica en dos etapas principales: nucleación y crecimiento. A su vez la etapa de crecimiento se la subdivide en tres períodos: crecimiento subcrítico, crecimiento crítico y “*Necking*”. Esto se describe a continuación y se ilustra en la figura 3.1.

Nucleación: Esta etapa es la primera en la formación de una burbuja, se inicia cuando comienza la inyección del aire por el orificio. La burbuja comienza su crecimiento formando un segmento de esfera. El volumen y la superficie crecen de manera continua. Inicialmente la relación superficie sobre volumen

decrece de manera abrupta y luego, a medida que continúa la inyección de aire, esta relación decrece de manera menos pronunciada. Esta etapa finaliza aproximadamente cuando la burbuja alcanza tres cuartos del volumen de una esfera de Radio R_0 , siendo R_0 el radio de la parte superior de la burbuja (parte que posee forma esférica).

Crecimiento subcrítico: En esta etapa la burbuja aumenta su tamaño de manera pronunciada.

Crecimiento crítico: La burbuja adquiere una forma elongada mientras continúa su crecimiento y comienza a desplazarse hacia arriba. En esta etapa se alcanzan los valores máximos de volumen y superficie.

“Necking”: Esta es la etapa final de la formación de la burbuja, la formación de un **“cuello”** comienza a desarrollarse en la parte inferior de la burbuja mientras la parte esférica de la burbuja asciende. El cuello continúa estrechándose hasta que la sección de la burbuja más cercana al orificio de salida se separa completamente.

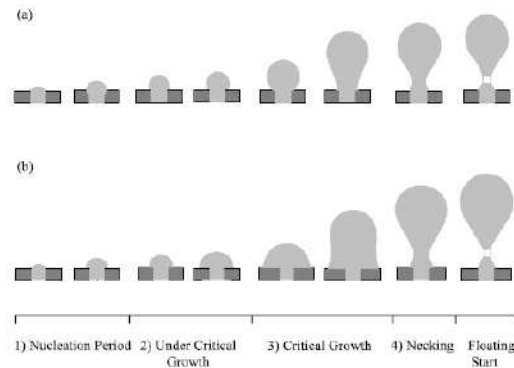


Figura 3.1: Etapas de la formación de una burbuja. Imagen tomada de [Gnyloskurenko et al., 2003].

Balance de fuerzas

El proceso de formación y desarrollo de una burbuja puede abordarse desde distintos enfoques, estos son: balance de fuerzas, análisis dimensional y elementos finitos. Dado que la formación es un proceso secuencial, existen modelos que lo describen como una única etapa, modelos de dos etapas y de multi-etapa.

A modo de ejemplo se plantean dos trabajos donde se aborda el fenómeno desde el enfoque del balance de fuerzas, se puede encontrar más bibliografía al respecto en [Kulkarni and Joshi, 2005]. En el anexo F se describe resumidamente un modelo de dos etapas, planteado en [Ramakrishnan et al., 1969]. Por otro lado, en [Gaddis and Vogelpohl, 1986] se plantea un abordaje distinto, donde se busca describir el fenómeno con una única ecuación que permita obtener el diámetro de desprendimiento de la burbuja.

De todos modos, es muy importante recalcar que no existe un modelo referencia para este campo, dado que la dinámica en las burbujas es muy compleja y se puede abordar desde distintos puntos de vista. Cada modelo se aproxima al fenómeno desde determinada perspectiva, siendo un ámbito de la ciencia que se encuentra en desarrollo permanente al día de hoy.

3.1.2. Volumen

El volumen de la burbuja depende únicamente del caudal de aire inyectado, siendo independiente tanto de las propiedades del fluido como del tamaño del orificio [Kobus, 1968].

Se identifican dos regímenes en función del caudal de aire [Mascha and Christensen, 1983]:

- Régimen estático: se da a caudal muy bajo ($Q_a \leq 1 \text{ cm}^3/s$), el volumen terminal de la burbuja se obtiene igualando empuje y la tensión superficial,

$$V_b = \frac{\pi d \cdot \sigma}{(\rho_w - \rho_a)g} \quad (3.1.1)$$

Donde d es el diámetro del orificio inyector, σ el coeficiente de tensión superficial, ρ_w y ρ_a las densidades del agua y del aire respectivamente.

- Régimen dinámico: ($Q_a > 1 \text{ cm}^3/s$) el tamaño de la burbuja depende exclusivamente del empuje y la inercia del líquido, mientras que la frecuencia f (de formación y emisión de burbujas) permanece constante, siendo D_s el diámetro de la burbuja

$$D_s = 1,38 \left(\frac{Q_a^2}{g} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.1.2)$$

Para ambos regímenes, el caudal de aire inyectado se relaciona con el volumen de la burbuja V_b mediante la siguiente expresión

$$Q_a = V_b \cdot f \quad (3.1.3)$$

- Régimen turbulento: ($Q_a \gg 1 \text{ cm}^3/s$) el tamaño de la burbuja y la frecuencia de formación varían de manera aleatoria.

3.1.3. Velocidad de ascenso

La componente vertical del campo de velocidades inducido por el flujo ascendente de burbujas que se inyectan desde un orificio, puede representarse (para cada sección horizontal) mediante una distribución Gaussiana, con su máximo ubicado en la línea central (línea perpendicular al orificio).

$$u(r, x) = u_c(x) e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3.1.4)$$

Donde u_c es la velocidad vertical en la línea central, σ es la desviación estándar de la distribución Gaussiana, r la distancia radial al orificio, x la distancia vertical al orificio.

La velocidad de las burbujas es esencialmente constante durante su ascenso, experimenta un aumento brusco al dejar el orificio pero se estabiliza rápidamente llegando a su velocidad terminal u_b , esto es válido

incluso para condiciones de agua en circulación [Miyagi, 1929]. La velocidad terminal depende del tamaño de las burbujas y de su concentración, siendo ambas funciones del caudal de aire. No depende de las características del orificio, ni de la profundidad (salvo para burbujas muy pequeñas) [Kobus, 1968].

Se denomina “*región inicial*” a la zona donde la burbuja experimenta un aumento brusco de la velocidad (según [Kobus, 1968] se encuentra a entre 2 y 3 cm del orificio). Las condiciones locales del orificio influyen en el desarrollo del flujo únicamente para este tramo. Luego, el flujo se da a velocidad terminal u_B , zona denominada “*región de flujo estable*”.

Con el objetivo de compensar la falta de trazabilidad de la “*región inicial*” se define un “*origen analítico*” a partir de la extensión virtual de la “*región de flujo estable*”, como se observa en la figura 3.2. Este “*origen analítico*” se ubica en la posición x_0 y es de esperarse que se encuentre por debajo del origen real (orificio). Se tiene que:

$$\frac{u(r, x)}{u_c(x)} = f\left(\frac{r}{x + x_0}\right) \quad (3.1.5)$$

$$\sigma = c(x + x_0) \quad (3.1.6)$$

Entonces:

$$\frac{u(r, x)}{u_c(x)} = u_c(x) e^{\frac{-r^2}{2c^2(x+x_0)^2}} \quad (3.1.7)$$

La variación de densidad en la “*región de flujo estable*” puede despreciarse [Kobus, 1968]. Entonces, mediante un balance de cantidad de movimiento, se llega a una expresión para la velocidad de la línea central en función de la velocidad terminal:

$$u_c(x) = \frac{1}{c(x + x_0)} \sqrt{\frac{-P_{atm} Q_0}{\pi \rho_w \bar{u}_b} \ln(1 - x/h^*)} \quad (3.1.8)$$

Siendo $h^* = h + \frac{P_{atm}}{\gamma_{agua}}$, h la columna de agua, c la tasa de propagación del perfil de velocidad de la burbuja según la ecuación 3.1.6 y Q_0 el flujo másico de aire por el orificio.

En la figura 3.2, ZFE es la “*región inicial*”, ZEF es la “*región de flujo estable*”.

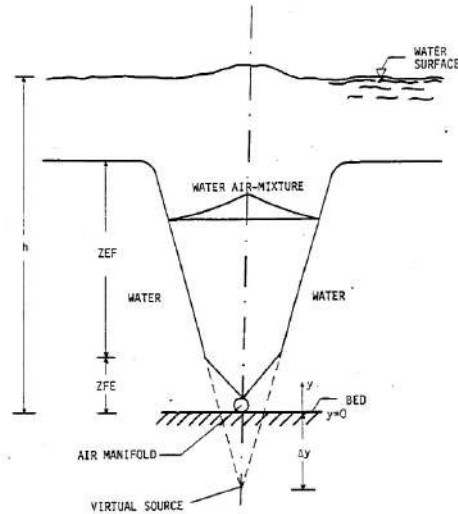


Figura 3.2: Regiones y origen analítico. Fuente: [Mascha and Christensen, 1983].

3.2. Barrera de burbujas

3.2.1. Clasificación

Existen dos posibles clasificaciones para los sistemas de gas inyectado en fluido viscoso. Si el flujo es dominado por la cantidad de movimiento el sistema se clasifica como "*buoyant jets*" y si el movimiento lo dominan las fuerzas de empuje entonces se lo clasifica como "*plumes*".

El efecto relativo de estos fenómenos se observa a partir del número de Froude 3.2.1, siendo L una dimensión característica de la burbuja y u su velocidad de ascenso.

$$Fr = \frac{\sqrt{u}}{gL} \quad (3.2.1)$$

En el caso de las barreras de burbujas como siempre $Fr < 1$, se las clasifica como "*plumes*" [Mascha and Christensen, 1983].

3.2.2. Flujo inducido

Al igual que en las burbujas individuales, el campo de velocidades de ascenso de barreras de burbujas obedece a una distribución de tipo Gaussiana, con el máximo en la zona central como se observa en la figura 3.3. Como se explica en [Kobus, 1985], esta velocidad puede ser entre dos y tres veces superior a la de una burbuja individual.

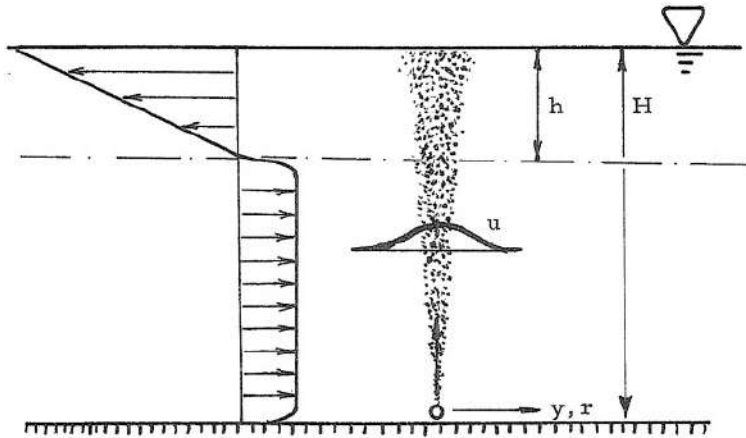


Figura 3.3: Campo de velocidades cercanas a una barrera de burbujas según Cederwall and Ditmars (1970)

Mediante un razonamiento análogo al presentado en la sección 3.1.3, [Kobus, 1968] presenta la siguiente expresión para la velocidad de la línea central de la barrera de burbujas en función de su velocidad terminal:

$$u_c(x) = \sqrt{\frac{-P_{atm}Q'_0 \ln(1 - x/h^*)}{\sqrt{\pi} \rho_w \bar{u}_b c'(x + x'_0)}} \quad (3.2.2)$$

Se utilizan los símbolos prima (') para diferenciarlos del caso desarrollado previamente relativo a la burbuja individual.

En el trabajo [Lo, 1991] se plantea la siguiente expresión para la velocidad vertical máxima, correspondiente al centro de la barrera:

$$v_{max} = K(gq)^{1/3} \quad (3.2.3)$$

Siendo g la aceleración de la gravedad, q el caudal de aire inyectado por unidad de longitud y K una constante de proporcionalidad. Esta misma expresión se plantea en varios estudios, pero con variaciones en el valor de K (como se observa en la tabla 3.4).

El movimiento ascendente de burbujas también induce un flujo horizontal en el agua circundante. Este se orienta hacia la barrera hasta cierta altura ($H-h$), donde se mantiene constante para toda altura, y opuesto a la barrera para alturas superiores, donde varía linealmente con la altura, ver figura 3.3. En el trabajo de [Lo, 1991] se halla experimentalmente que este punto de inflexión se encuentra a un 18 % (medido desde la superficie) de la altura del agua, o sea $h = 0,18H$.

Si se desprecia la pérdida de energía, la corriente inducida a nivel superficial es igual a la velocidad máxima vertical presentada en la ecuación 3.2.3, es decir $v_{max} = U_{max}$. Además, se concluye que la corriente superficial inducida es independiente del diámetro del orificio, siendo únicamente dependiente del caudal

de aire inyectado (proporcional a la raíz cúbica del mismo).

author	laboratory or prototype	water depth D^* (m)	horizontal distance from the location of maximum surface velocity to the manifold (m)	value of K
Evans (1955)	laboratory	0.91	-	1.10
Bulson (1961)	prototype	2.59-10.36	0.5-0.75 D	1.46
Abraham and Burgh (1964)	prototype	11	0.3-0.60 D	1.22
Basco (1971)	laboratory	0.30-2.35	0.3-0.60 D	1.50
Jones (1972)	laboratory	2.13	0.40 D	1.47

* D = vertical distance from the free surface to the manifold

Figura 3.4: Valores de K bajo distintas condiciones de laboratorio. Tabla extraída de [Lo, 1991].

Flujo inducido con agua en movimiento

Si el agua se encuentra en movimiento, con dirección perpendicular a la barrera, las condiciones cambian. La línea central de la barrera de burbujas, donde se da la velocidad máxima ascendente, ya no se ubica sobre el tubo sino que se desplaza aguas abajo, como se ve en la figura 3.6. Además, incluso con caudales de agua moderados, se observa una disminución en la velocidad de ascenso del conjunto de burbujas, llegando a una velocidad similar (del mismo orden) que la de una burbuja individual [Kobus, 1985].

[Lo, 1991] estudió experimentalmente las corrientes superficiales inducidas en el agua bajo estas condiciones. Los resultados arrojan que, dado un caudal de aire inyectado y a caudal de agua uniforme, la corriente superficial máxima generada depende tanto de la profundidad como de la velocidad del canal. Si el canal es profundo y la velocidad es baja, entonces se puede aplicar el principio de superposición lineal para las velocidades de la siguiente forma:

$$U'_{max} = U_{max} - U_{agua} \quad (3.2.4)$$

Siendo U_{max} la velocidad superficial que se generaría en condiciones de agua estanca, calculada según 3.2.3 y U_{agua} la velocidad superficial del agua.

De lo contrario, si el canal es "llano" y de alta velocidad, la corriente superficial generada será menor a la predicha por 3.2.4, llegando a ser despreciable en algunos casos como se puede ver en la tabla 3.5.

test conditions									
x/D	water depth=0.8 m			water depth=0.6 m			water depth=0.4 m		
	still water	channel current		still water	channel current		still water	channel current	
		0.06 m/s	0.1 m/s		0.06 m/s	0.1 m/s		0.06 m/s	0.1 m/s
0.10	0.21	0.16	0.08	0.20	0.15	0.03	0.14	0.14	-0.03
0.20*	0.22	0.17	0.11	0.21	0.16	0.02	0.20	0.15	-0.02
0.30	0.20	0.14	0.06	0.20	0.14	-0.01	0.19	0.14	-0.04
0.40	0.19	0.13	0.05	0.18	0.12	-0.04	0.17	0.13	-0.06
0.50	0.17	0.11	-0.05	0.17	0.11	-0.05	0.16	0.12	-0.07
0.75	0.15	-0.07	-0.08	0.15	0.08	-0.08	0.15	0.08	-0.08
1.00	0.13	-0.03	-	0.13	0.04	-0.09	0.13	0.05	-0.09
1.25	0.12	-0.04	-	0.12	-0.03	-	0.12	0.03	-
1.50	0.11	-0.05	-	0.10	-0.05	-	0.09	-0.03	-
1.75	0.09	-	-	0.08	-0.06	-	0.08	-0.04	-
2.00	0.07	-	-	0.07	-	-	0.05	-0.04	-

* Location of maximum surface current

Figura 3.5: Medidas de corriente superficial bajo disitntas condiciones. Imagen obtenida de [Lo, 1991]

Cuando hay corriente de agua, la altura h a la cual la corriente inducida cambia de sentido, resulta descender de 18 % a valores de entre 8 y 13 % del tirante del canal. Además, si la velocidad del agua aumenta demasiado, este porcentaje se reduce hasta el punto en que no se logra generar corriente contraria a la dirección del flujo de agua.

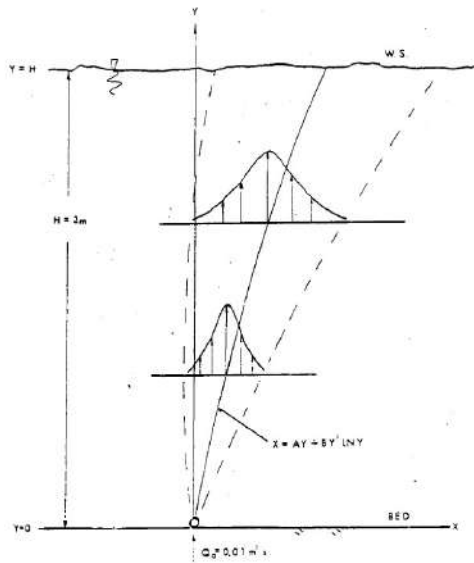


Figura 3.6: Forma aproximada de una barrera de burbujas en agua en movimiento. Imagen obtenida de [Mascha and Christensen, 1983]

3.3. Números adimensionados

Los números adimensionados son una herramienta importante en la física y la ingeniería para analizar el comportamiento de un sistema sin necesidad de conocer todos los detalles de las variables involucradas.

Es bien sabido que para la utilización del método de similitud entre dos sistemas geoméricamente símiles, en fluidos de una sola fase, se debe asegurar que se trabaja con un número de Reynolds igual entre ambos. Sin embargo, en sistemas burbujeantes líquido-gas, no hay establecida una condición para asegurar la similitud de manera confiable. Uno de los motivos se encuentra en la variabilidad de escalas de tiempo y longitud para estos casos. En general, la ausencia de similitud en este tipo de flujos, obliga a realizar ensayos piloto a escala real previo a la puesta en marcha.

$$Re = \frac{F_i}{F_\mu} = \frac{\rho_L V_T d}{\mu_L} \quad (\text{Bubble Reynolds number})$$

$$We = \frac{F_i}{F_s} = \frac{\rho_L V_T^2 d}{\sigma} \quad (\text{Weber number})$$

$$Eo = \frac{F_b}{F_s} = \frac{\Delta \rho g d^2}{\sigma} \quad (\text{Eötvös number})$$

$$Fr = \sqrt{\frac{F_i}{F_b}} = \frac{V_T}{\sqrt{\Delta \rho g d / \rho_L}} \quad (\text{Froude number})$$

$$M = \frac{F_b^4 F_i}{F_s^3 F_i^2} = \frac{g \mu_L^4 \Delta \rho}{\rho_L^2 \sigma^3} \quad (\text{Morton number})$$

Figura 3.7: Números adimensionados. Fuente [Tomiyama, 2002].

En [Tomiyama, 2002] se deduce, a partir de la ecuación de Navier-Stokes y la continuidad, para una burbuja puntual ascendiendo en un líquido viscoso infinito en reposo, los números adimensionados presentados en la figura 3.7. Para esta situación, son cuatro las fuerzas que caracterizan el movimiento: la fuerza de inercia, la fuerza viscosa, la tensión superficial y las fuerzas de flotabilidad.

Para el diseño realizado en este proyecto se utiliza un enfoque experimental, ensayando directamente una sección del prototipo y no un modelo a escala. De este modo, al no haber cambios de escala ni grandes cambios de condiciones, no es necesario (ni conveniente por lo mencionado previamente) adentrarse en la teoría de similitud.

Por todo lo comentado se plantea inicialmente y de manera introductoria esta teoría pero no se lleva a cabo un mayor desarrollo en los siguientes capítulos.

Capítulo 4

Ensayos de caracterización de barrera de burbujas

4.1. Objetivo

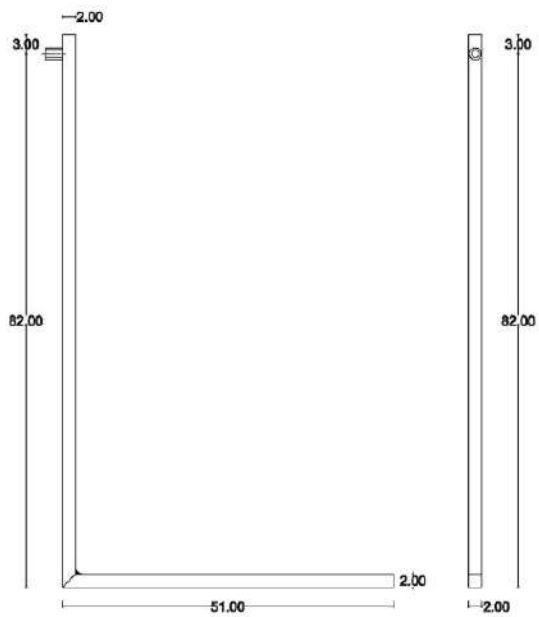
El objetivo de este ensayo es realizar una primera aproximación a los parámetros más importantes que caracterizan a una barrera de burbujas. De esa forma se busca lograr un primer entendimiento del funcionamiento del sistema y comprender el funcionamiento de los sistemas de medición a utilizar: canal de agua estanca, cámara de alta velocidad y programas de análisis de video. Los parámetros estudiados son velocidad de ascenso de la burbuja, frecuencia de salida y densidad de la malla de burbujas.

4.2. Descripción del banco de ensayos

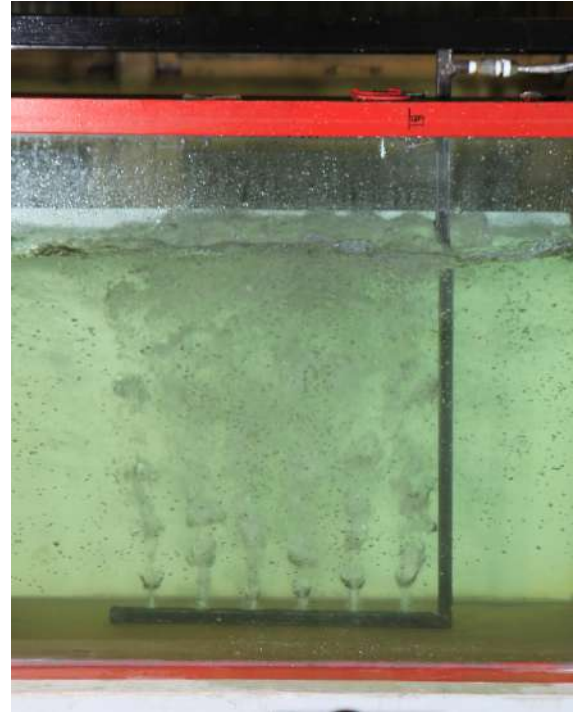
El banco de ensayos está compuesto por un compresor recíprocante de 3 HP que alimenta con aire un tubo de hierro de sección cuadrada (2 cm x 2 cm y 0,2 cm de espesor) en forma de L. Para este ensayo se utilizan dos variantes de tubo en L; uno con 12 agujeros separados una distancia de 38 mm entre ellos y otro de 6 agujeros con separaciones de 75 mm. Se instala un manómetro y un caudalímetro en la boca de entrada al tubo para registrar las condiciones de presión y caudal a las que se realiza el ensayo.¹ El tubo en L se instala en un canal con paredes de vidrio y agua en reposo, con un nivel de agua medido como referencia desde el fondo del canal de 56,5 cm.

En la figura 4.1 se presenta un plano del tubo en L con sus dimensiones y una imagen de una de las configuraciones de BdB ensayadas. A su vez en la en la figura 4.2 se presenta un esquema de la instalación.

¹Debido a un error del instrumento (el cual se explica en el Anexo A) no se reportan datos de caudal de aire en este ensayo.



(a) Diagrama



(b) Fotografía

Figura 4.1: Dispositivo en L

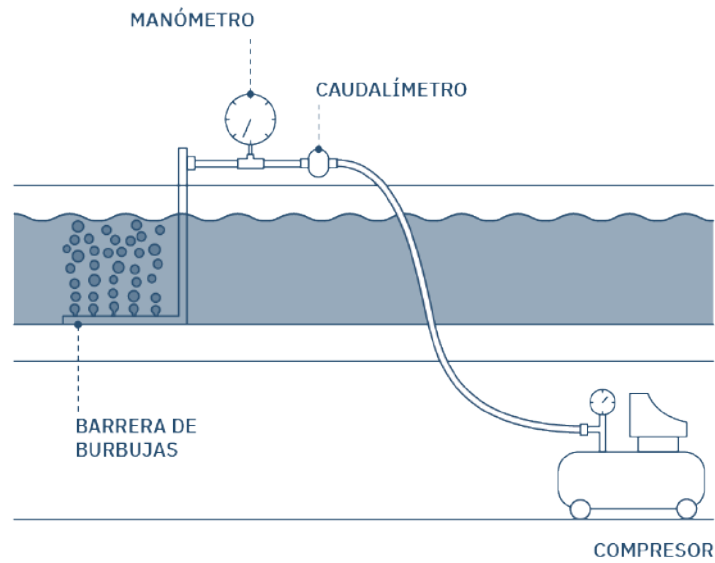


Figura 4.2: Diagrama de banco de ensayo

Se utiliza una cámara de alta velocidad Photron FASTCAM Mini UX100 (tamaño mínimo de píxeles $10\mu\text{m}$, velocidad mínima de disparo $1\mu\text{s}$) [Photron, ncom] con el objetivo de poder observar en detalle el comportamiento de las burbujas durante su ascenso.

Para cada configuración de la BdB ensayada se realiza una filmación de aproximadamente 15 segundos con una tasa de 500 fps (frames per second) y una resolución de 1280 x 1024 píxeles. La cámara se instala de manera frontal al tubo en L a una altura de 1,15 m y a una distancia de 1,65 m del vidrio delantero del canal. Luego, se procede a nivelar la cámara con la ayuda de un medidor de nivel y se asegura su correcto direccionamiento (con un puntero láser).

Con la cámara en posición se continúa con la calibración utilizando un tablero cuadrículado que posteriormente funciona como referencia dimensional durante la etapa del procesamiento de las imágenes. Se coloca un fondo blanco en el canal y luces LED para lograr un mejor contraste con las burbujas.

En la figura 4.3 se presenta un esquema con la disposición de la cámara y luces, en tanto en la figura 4.4 se muestra una foto del banco de ensayos en la cual se aprecia, el tablero cuadrículado utilizado para la calibración y la cámara de alta velocidad.

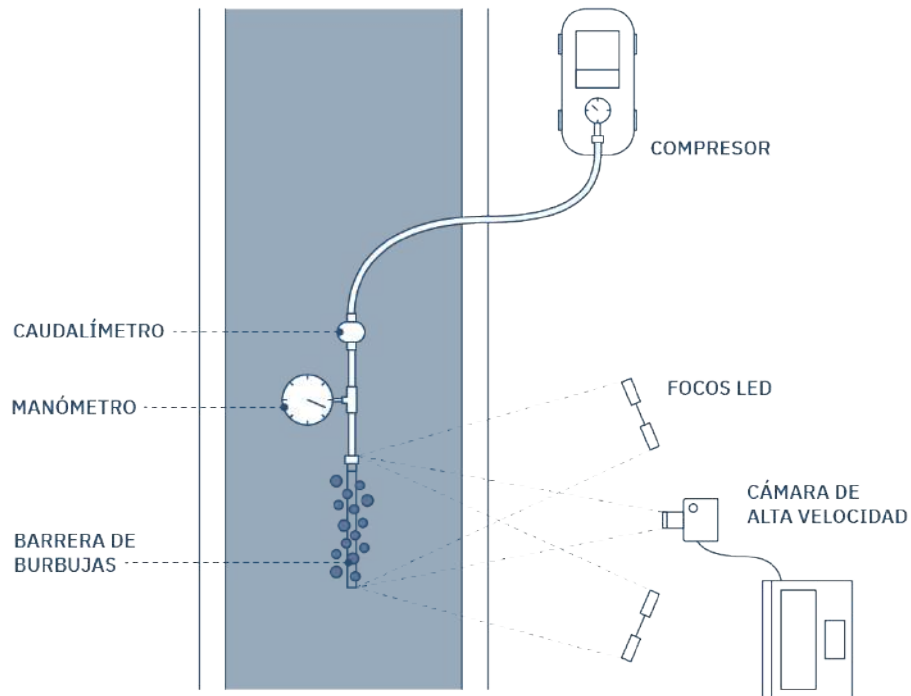


Figura 4.3: Diagrama de banco de ensayo, indicando disposición de luces y cámara.

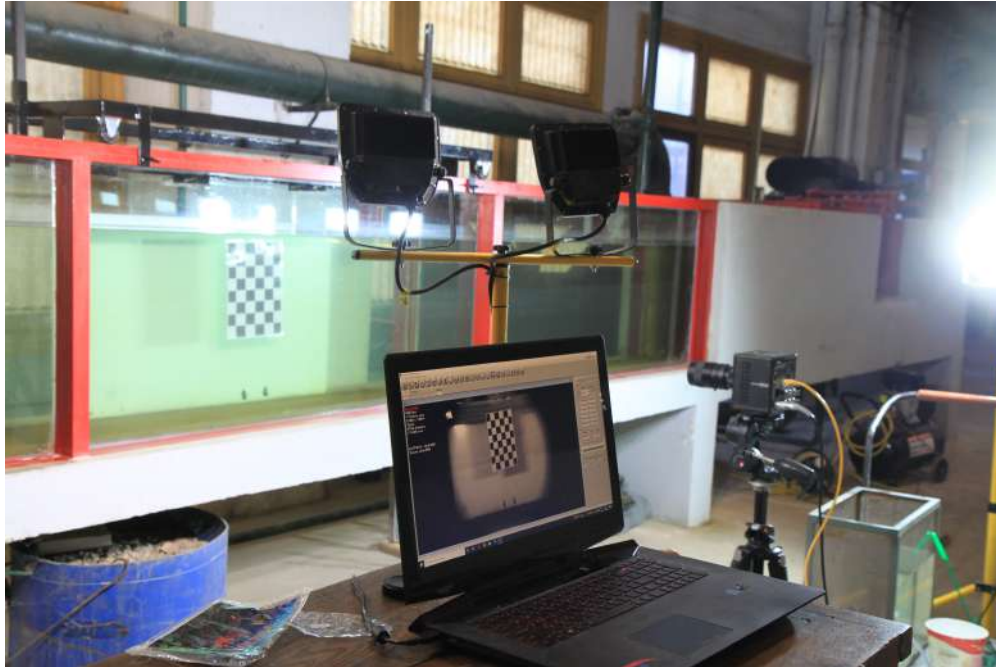


Figura 4.4: Banco de ensayo, proceso de registro de cuadrículado.

Se observan las distintas BdB generadas a diferentes presiones 0,15 - 0,35 - 0,50 y 0,75 bar (medida indicada en el manómetro); estas presiones se obtienen mediante la regulación por medio de la válvula del compresor. Cada una de estas presiones se ensaya para orificios de 1 mm de diámetro con separaciones de 38 mm y 75 mm. El tubo en L con orificios de 2 mm de diámetro se ensaya únicamente con separaciones de 75 mm; esto se debe a que se identifica que por el tamaño de las burbujas generadas no se obtendrían imágenes provechosas para su posterior análisis si se utilizara el tubo en L con menor separación entre orificios.

En las figuras 4.5, 4.6, 4.7 se presentan imágenes de las configuraciones ensayadas.

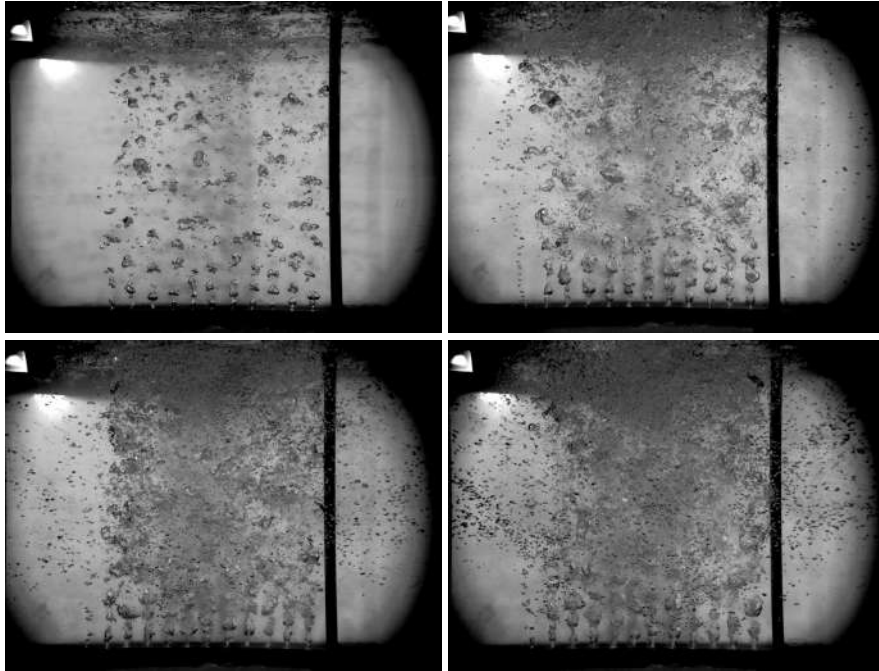


Figura 4.5: Configuración de 1 mm de diámetro de orificio y 38 mm de espaciamento para presiones de 0,15; 0,35; 0,50 y 0,75 bar respectivamente

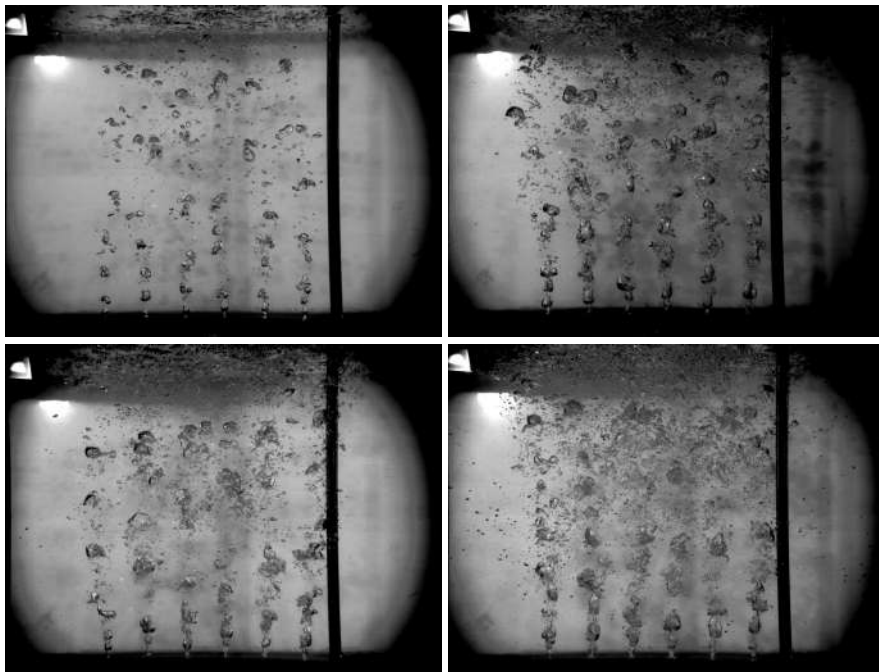


Figura 4.6: Configuración de 1 mm de diámetro de orificio y 75 mm de espaciamento para presiones de 0,15; 0,35; 0,5 y 0,75 bar respectivamente

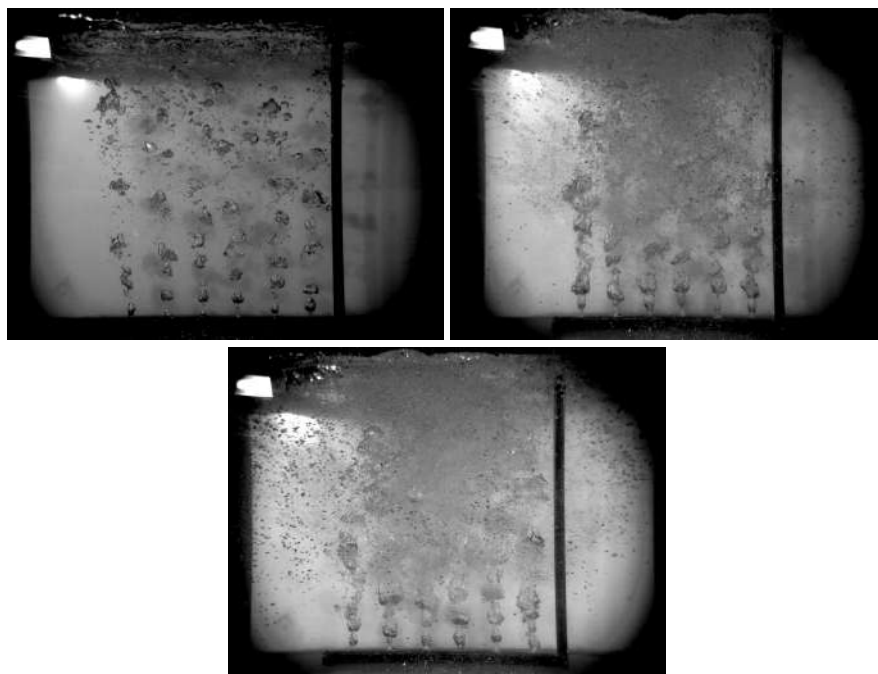


Figura 4.7: Configuración de 2 mm de diámetro de orificio y 75 mm de espaciamento para presiones de 0,15; 0,5 y 0,75 bar respectivamente

Es posible evidenciar cómo las diferentes presiones y configuraciones de orificios afectan la forma de la barrera. Cuando se tiene un mayor número de orificios, se incrementa el número de burbujas para una misma zona de referencia (Densidad media de burbujas - DMB, de la que se hablará con más detalle en las siguientes secciones). Para mayores presiones se aprecia cómo las burbujas se rompen en su ascenso debido a los choques entre las propias burbujas, separándose en burbujas más pequeñas y formando una cortina continua, mientras que aquellas que no colisionan continúan su ascenso deformándose y aumentando su volumen. El motivo de esta deformación puede atribuirse en parte a una mayor turbulencia en el canal, lo cual sugeriría que los vórtices generados en la parte superior perturban a las burbujas ascendentes en mayor medida a presiones más grandes. En cambio, las burbujas más pequeñas tienden a mantener su forma hasta mayor altura, tendiendo a un aumento en su volumen al ascender. Por lo tanto, a menores presiones, que implican menores tamaños de burbujas, suele observarse el mismo comportamiento.

4.3. Análisis de resultados

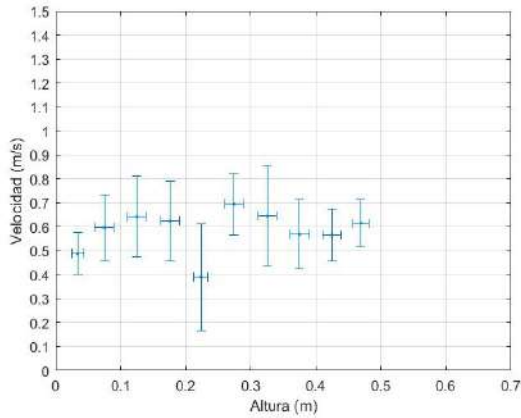
Para las diferentes configuraciones del ensayo se busca caracterizar los parámetros más relevantes de la malla: velocidad de ascenso de las burbujas y estructura de la malla. Se relaciona estos parámetros con la presión de aire y con las distintas configuraciones de orificios. Para la velocidad de ascenso se utiliza el programa de análisis de video Tracker [Open source physics, 2005] y para la caracterización de la malla se utiliza el programa de análisis de vídeo ImageJ-Fiji, [ImageJ Fiji, 2011].

4.3.1. Velocidad de ascenso de las burbujas.

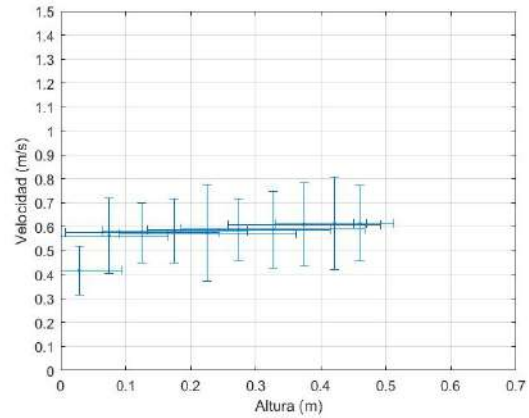
Se analiza la velocidad de ascenso de las burbujas para las diferentes configuraciones ensayadas. Utilizando el programa de análisis de video Tracker [Open source physics, 2005], se sigue a diferentes burbujas durante su ascenso, tomando como referencia siempre el punto más alto de la burbuja y no su centro para minimizar el error debido a las variaciones de forma de la misma durante su ascenso. Con este método se obtienen las distintas posiciones para un tiempo y con estos datos, la velocidad.

Para cada configuración se calcula la velocidad para 8 burbujas. Luego se promedian según franjas de 0,05 m de altura y de esta manera se obtiene un promedio para cada una de estas secciones. En la figura (4.8) se presenta la velocidad de ascenso de las burbujas para las configuraciones ensayadas para 1 mm de diámetro de orificio ². Las barras representan la dispersión de las medidas tanto en velocidad (eje y) como en altura (eje x).

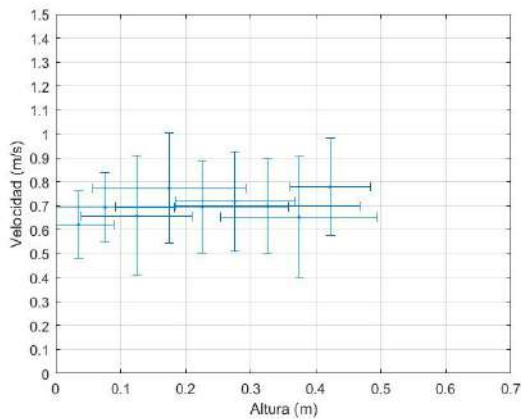
²Debido a la distorsión por alta presión, fenómeno comentado en la sección 5.5.3, no se pudo medir la velocidad para la configuración correspondiente a 0,75 bar.



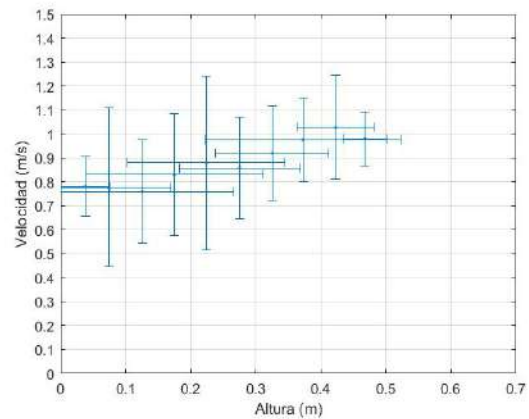
(a) 0.15 bar - 1 mm - 38 mm.



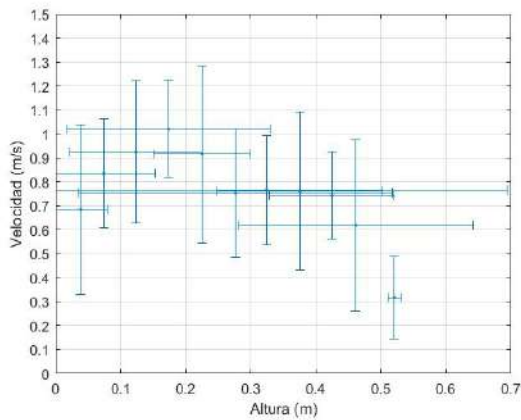
(b) 0.15 bar - 1 mm - 75 mm.



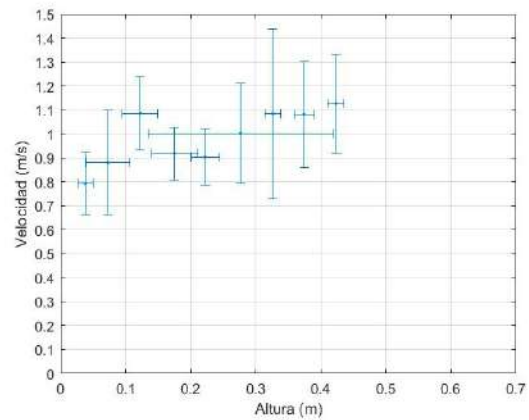
(c) 0.15 bar - 2 mm - 38 mm.



(d) 0.35 bar - 1 mm - 38 mm.



(e) 0.35 bar - 1 mm - 75 mm.



(f) 0.50 bar - 1 mm - 38 mm.

Figura 4.8: Velocidad de ascenso de burbujas en función de la posición vertical para las distintas configuraciones ensayadas para 1 mm de diámetros de orificios en tubo en L.

Es posible ver cómo el comportamiento de las velocidades se mantiene relativamente constante para las distintas alturas en cualquiera de las configuraciones ensayadas, pero aun así puede observarse que según las características del dispositivo y las presiones de salida la velocidad promedio varía.

4.3.2. Variación de velocidad en función de la presión

La velocidad promedio obtenida para una presión de 0,15 bar, orificios de 1 mm de diámetro y una separación de 38 mm (figura 4.8a) fue de 0,64 m/s . Para una misma configuración pero aumentando la presión a 0,35 bar la velocidad promedio obtenida fue de 0,85 m/s (figura 4.8d), mientras que aumentando a 0,5 bar fue de 0,95 m/s (figura 4.8f). Esto marca una tendencia al alza de la velocidad con un aumento de la presión.

4.3.3. Variación de velocidad en función del diámetro de orificios

Al variar el diámetro de salida a 2 mm, se obtuvo una velocidad promedio de 0,68 m/s para una presión de 0,15 bar (figura 4.8c). Para la misma configuración pero con orificios de 1 mm de diámetro la velocidad promedio obtenida fue de 0,64 m/s (4.8a) por lo que no se identifica una clara diferencia al variar el diámetro en los orificios y se supone que la variación se deba al propio margen de error de la medida. Esta observación coincide con lo comentado en la sección 3.1.3.

4.3.4. Variación de velocidad en función del espaciamiento entre orificios

Para una presión de 0,15 bar, y orificios de 1 mm de diámetro y separación de 75 mm la velocidad promedio fue de 0,58 m/s (figura 4.8b). Para la presión de 0,35 bar y misma separación, la velocidad promedio fue de 0,80 m/s (figura 4.8e)³. En relación a las mismas configuraciones pero para una separación de 38 mm se obtienen velocidades de 0,64 m/s y 0,85 m/s respectivamente, por lo que tampoco se evidencia una clara influencia de este parámetro sobre la velocidad de ascenso de las burbujas.

A partir de estos resultados obtenidos es posible distinguir los siguientes comportamientos. Manteniendo una misma configuración y aumentando la presión las velocidades aumentan. Al variar únicamente la separación entre los orificios o su diámetro no se aprecia una variación significativa en cuanto a la velocidad.

Es posible apreciar cómo se ve afectada la desviación estándar; esto se debe a la gran dificultad para poder obtener las medidas. Los motivos fueron comentados anteriormente: alta turbulencia, deformación y fragmentación de las burbujas, entre otros. Como se menciona en 4.2, es importante destacar que los resultados pueden verse fuertemente afectados debido a las grandes turbulencias que se generan dentro del canal ocasionadas por el propio flujo de aire.

4.3.5. Caracterización de la forma de malla.

Se plantea caracterizar la forma de la malla, para lo cual se define la Densidad de Malla de Burbujas (DMB) según zonas (DMB toma valores de 0 a 1). La DMB se calcula como el cociente entre el área total frontal de las burbujas captadas dentro de cada rectángulo que define a una de estas zonas, dividida entre

³Observación: la última medida se descarta dado que se trata de un valor atípico.

el área total del rectángulo. Se seleccionan tres zonas representativas: zona baja, zona media y zona alta. Se mide el área de burbujas (o aire) visible. En la figura (4.9) se presenta un esquema con los rectángulos por zonas utilizados para el cálculo de la DMB.

Debido a la alta turbulencia evidenciada para las presiones de 0,5 y 0,75 bar, no fue posible cuantificar la DMB, por lo tanto sólo se analiza este parámetro para las presiones menores (0,15 y 0,35 bar). Este procedimiento se realiza para las dos separaciones entre orificios: 38 y 75 mm, en ambos casos con diámetro de orificio de 1 mm.

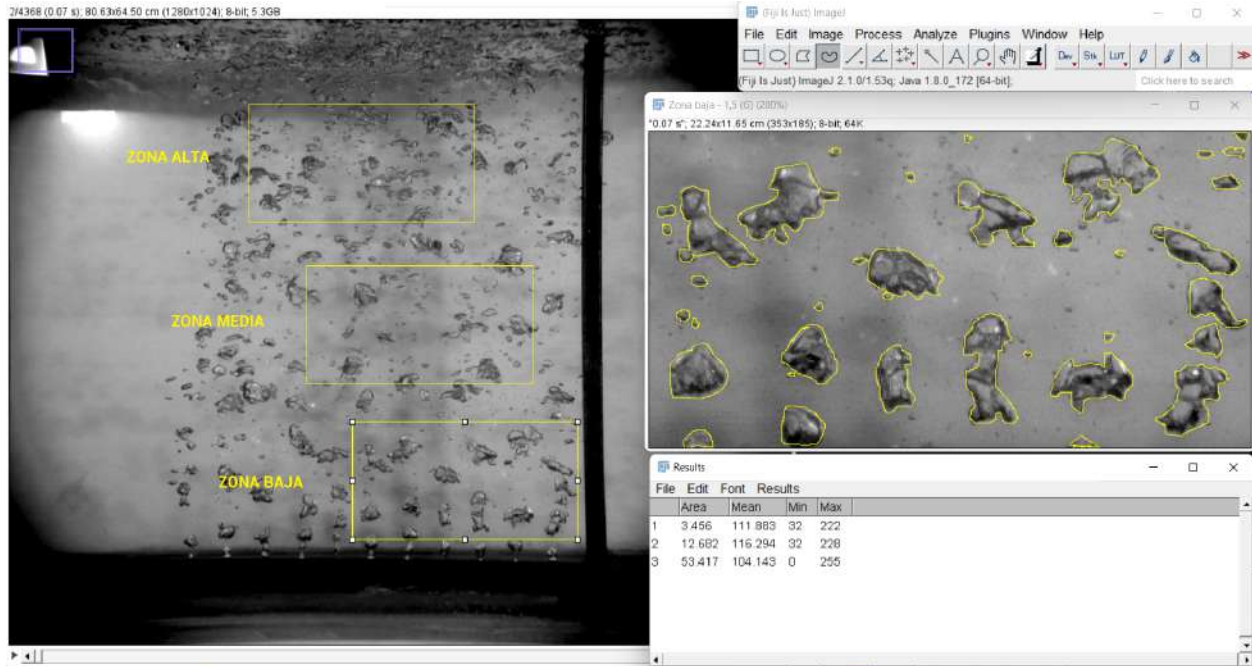


Figura 4.9: Zonas DMB

En las figuras (4.10a) y (4.10b) se presenta un gráfico de barras de DMB por zonas para la configuración de L con orificios de 1 mm y espaciamiento entre orificios de 38 mm y 75 mm respectivamente.

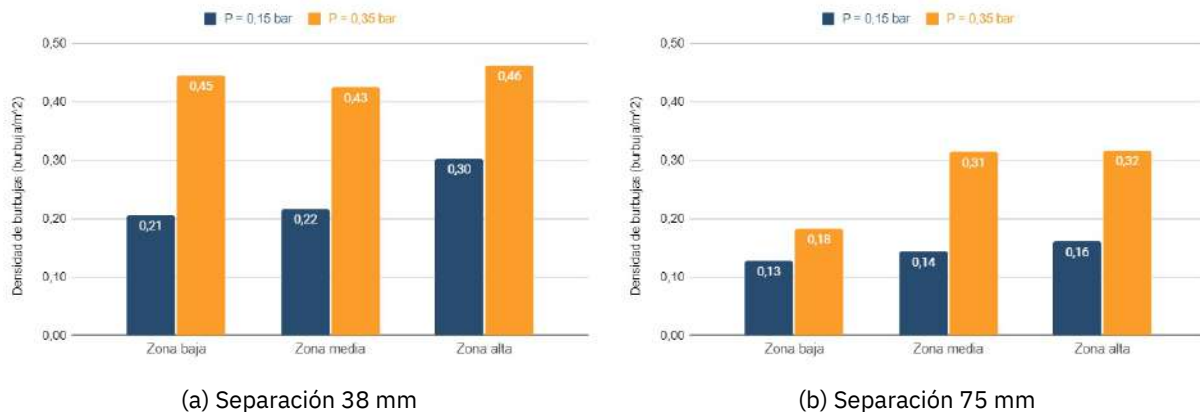


Figura 4.10: DMB para orificios de 1 mm

Se puede observar, para las dos configuraciones presentadas, un comportamiento creciente de la DMB en dirección vertical. También se observan valores más altos de DMB para el dispositivo con menor separación entre orificios en comparación con el de mayor separación, lo cual parece razonable, manteniéndose el comportamiento mencionado para las distintas alturas. Además, es posible apreciar que para las dos configuraciones ensayadas, la DMB a 0,35 bar es mayor que a 0,15 bar. Cabe destacar que en la dirección horizontal la DMB se mantiene relativamente uniforme para todas las configuraciones.

Un efecto no menor a tener en cuenta en el desarrollo de un dispositivo para la captación de plásticos, es que la DMB de la barrera pueda verse afectada por las propias corrientes de un curso de agua. En principio se generará una inclinación de la barrera en el sentido de la corriente (como se menciona en la sección 3.2.2 y se puede ver en la figura 3.5) que puede tener repercusiones en las DMB reportadas. Será necesario incorporar este efecto en las futuras actividades experimentales para simular condiciones más realistas dentro del canal. Este fenómeno se menciona en el trabajo de [Zhang et al., 2022].

4.3.6. Regiones del flujo de burbujas

Como observación final se realiza una filmación de la barrera ubicándola rotada 90° respecto de su posición inicial. De este modo la cámara queda alineada con la barrera y se puede observar su geometría desde este nuevo plano.

En la figura 4.11 se presenta una imagen intervenida, donde se muestran las dos regiones del flujo y el origen analítico, descrito previamente en la sección 3.1.3. Se observa que la longitud de la región inicial es aproximadamente de 34,5 mm, levemente superior a la referencia presentada en [Kobus, 1968] (entre 2 y 3 cm).

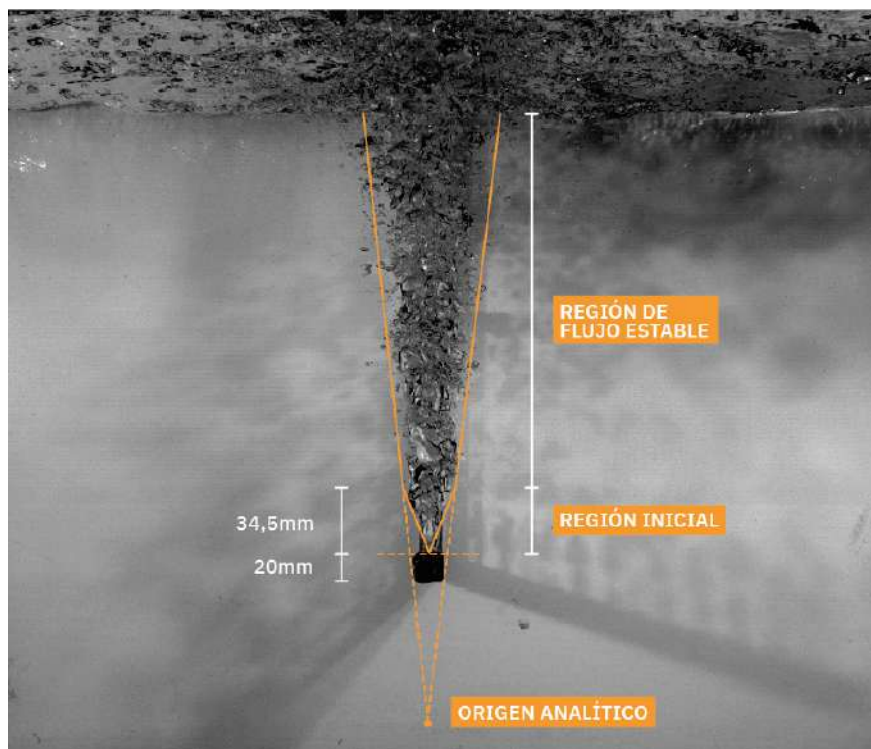


Figura 4.11: Definición de región inicial, región de flujo estable y origen analítico para el dispositivo ensayado.

4.4. Ensayo con peces

A los efectos de tener una primer valoración cualitativa se procede a instalar una BdB con el tubo en L con 75 mm de separación entre orificios a modo de evaluar el comportamiento de especies de peces ornamentales: carpas (*Cyprinus carpio*) y *Corydoras Spp*. Se visualizó el comportamiento de 2 carpas de entre 9 y 10 cm de longitud y 10 corydoras de entre 5 y 6 cm de longitud durante una hora.

Las corydoras se mostraron más proclives al pasaje por la barrera mientras que las carpas se mantuvieron a distancia.

Se pudo observar que la barrera generaba corrientes dentro del canal, lo que alejó al ensayo del comportamiento de la barrera en un curso natural. Respecto al comportamiento evidenciado, ambas especies intentaban alejarse de la barrera, nadar en contra de la corriente generada, aunque las corydoras de menor porte atravesaron en forma frecuente la barrera.

Aún así ambas especies pudieron atravesar la barrera de un lado al otro, cualidad necesaria en la barrera para no perturbar a las especies que puedan encontrarse en el curso de agua.

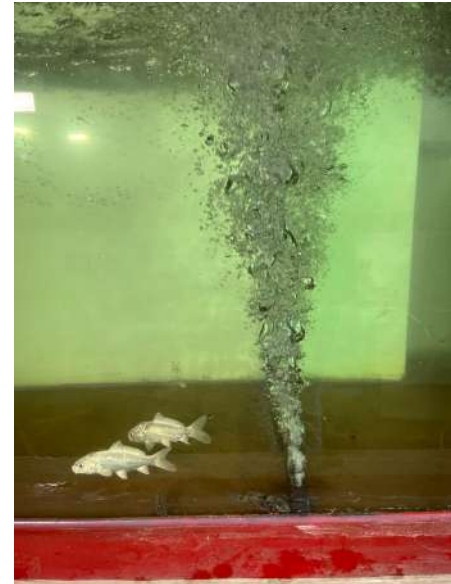
De este experimento se concluye la necesidad del desarrollo de otros experimentos específicos, evaluando el comportamiento de especies autóctonas en presencia de una corriente para simular una situación más realista. También resulta importante tomar medidas de nivel sonoro [Hastings and Popper, 2005],

[Scholik and Yan, 2001]. En dichos experimentos se espera comprender si es esperable que la barrera pueda causar algún efecto en la conducta de la fauna presente en el curso de agua.

A modo ilustrativo, en la figura (4.12) se presentan dos imágenes de lo comentado.



(a) Banco de ensayos con peces



(b) Corydoras y BdB

Figura 4.12: Ensayo de comportamiento de peces frente a la BdB

4.5. Comportamiento de "JET"

El comportamiento de "JET" puede observarse para muchas de las burbujas en los vídeos analizados. Ocurre cuando dos burbujas se encuentran próximas en la dirección vertical. El movimiento de la primera burbuja genera una depresión que impulsa a la siguiente a mayor velocidad, esto provoca la forma de "JET". Al tomar contacto una burbuja con otra ambas terminan uniéndose o en algunos casos destruyéndose como puede observarse en las imágenes. Este fenómeno se evidencia principalmente para altas presiones provocando la destrucción de muchas de las burbujas analizadas como se menciona en la sección 5.5.3.

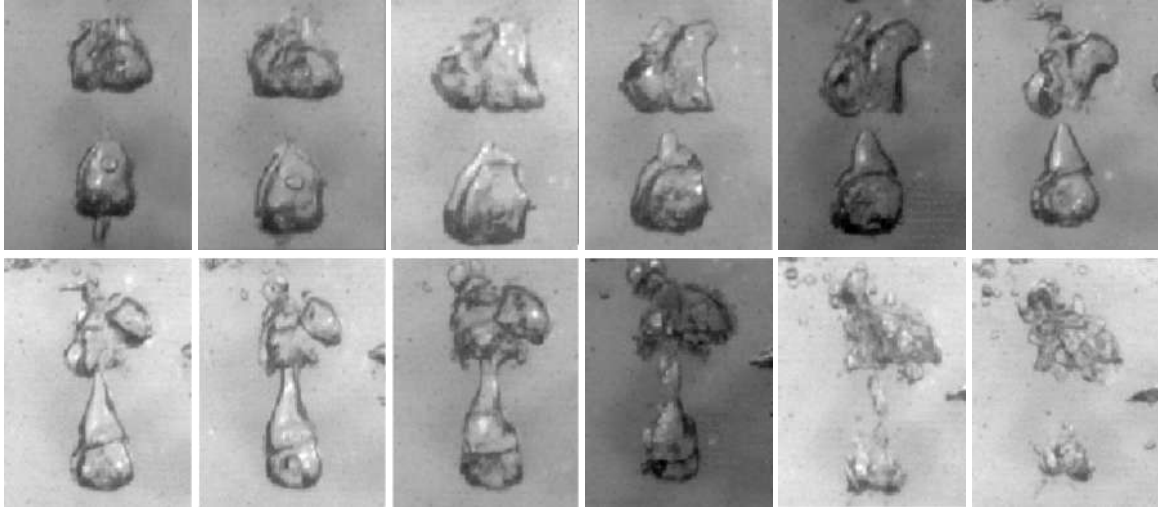


Figura 4.13: Comportamiento de Jet

4.6. Conclusiones del primer ensayo, agua en reposo

Se logra implementar un primer experimento de visualización de BdB a modo de caracterizar parámetros relevantes necesarios para el desarrollo de un prototipo con el objetivo de captar plásticos en cursos de agua.

Respecto a la cinemática de la burbuja, los datos muestran que las velocidades se mantienen relativamente constantes durante su trayectoria y que son mayores para burbujas de mayor volumen (ver 4.3.1). Ese comportamiento fue observado y descrito por Miyagi en su ensayo [Miyagi, 1929] como se menciona en la sección 3.1.3 del capítulo “Fundamentos”.

Las velocidades para las configuraciones de presión más elevadas son mayores; esto se debe a que la fuerza de empuje, que es la que brinda la aceleración en dirección vertical ascendente para las burbujas, resulta proporcional al volumen de fluido desplazado, el cual se aprecia con más claridad a mayores presiones en las distintas configuraciones de barrera ensayadas.

Con respecto a la forma de la barrera se concluye que a menor separación entre los orificios, mayor es la DMB. Este resultado es esperable dado que al tener salidas de aire más cercanas entre sí, se genera una malla más uniforme. Además, la DMB aumenta con la altura, teniendo mayor cantidad de aire por unidad de área cerca de la superficie. Este parámetro puede ser muy importante a la hora de evaluar la capacidad de retención de sólidos de la barrera. En cuanto a la presión, se determina que, al aumentar la misma, aumenta la DMB de manera considerable.

Las observaciones realizadas a lo largo del ensayo señalan que a presiones menores las burbujas tienen menor volumen. Las burbujas más pequeñas tienden a mantener su forma hasta mayor altura, tendiendo a un aumento en su volumen al ascender, pero manteniendo su forma “esférica”. Cuando la presión es mayor se observa no sólo cómo se rompen en su ascenso debido a los choques, sino que aquellas que no colisionan y logran continuar íntegras comienzan a deformarse y a aumentar su volumen. El motivo de esta

deformación puede estar asociado al fenómeno de turbulencia, lo cual sugeriría que los vórtices generados en la parte superior del canal perturban a las burbujas ascendentes, en mayor medida a presiones mayores.

Respecto al análisis del comportamiento de los peces en los entornos de la barrera, no puede extraerse una conclusión certera debido a las grandes recirculaciones generadas por la barrera en el canal, dificultad mencionada en 4.4. Es necesario analizar, en condiciones más similares a las de un curso de agua natural, si la presencia de las burbujas afecta el comportamiento habitual de las especies. Se destaca nuevamente la importancia de realizar un análisis sonoro de la barrera, dado que este aspecto resulta incluso más importante que el aspecto físico en lo que respecta al impacto sobre la fauna acuática. A su vez se menciona la posibilidad de construir un pasaje libre de burbujas en la zona inferior al sistema de recolección en caso de que la vida se viera perturbada por las corrientes que genera la barrera.

Capítulo 5

Ensayo de prototipo

5.1. Objetivo

Este ensayo tiene como objetivo estudiar un primer prototipo del sistema generador de burbujas en un canal de hormigón con agua en movimiento. Se busca replicar de forma más precisa las condiciones a las que estará expuesta la barrera de burbujas cuando se encuentre en funcionamiento. Ensayar la barrera con una corriente de agua permite obtener una noción de su poder de retención de residuos. A su vez, el uso de este banco de ensayos posibilita un análisis detallado del vínculo entre los distintos parámetros que hacen al funcionamiento de la barrera.

Con este propósito se subdivide este ensayo en tres partes, en una primera etapa, se replica el primer ensayo realizado en el canal de vidrio pero para un nuevo dispositivo de salida de burbujas (tubo de PVC flexible). Se estudian los parámetros más relevantes entre los cuales se encuentran la velocidad, la densidad de burbujas y la frecuencia de emisión.

En una segunda etapa se procede con el ensayo en el canal de hormigón con agua en movimiento, reproduciendo de esta manera las condiciones a las cuales estará expuesta la barrera para determinar su efectividad de forma más cercana a una situación de implementación real. Se utilizan distintos tipos de residuos que podrían encontrarse en un entorno urbano.

Como tercera etapa se realiza un nuevo ensayo en el canal de hormigón pero como residuos se utilizan objetos de igual geometría y distinta densidad. La intención de realizar este ensayo es poder estudiar cómo la barrera se comporta frente a sólidos de distintas densidades.

Se determina el porcentaje y las características de los contaminantes sólidos que la barrera logra retener, para distintas configuraciones de caudal, tirante de agua y presión del aire; para de esta forma, encontrar un estimado del rango de presiones óptimas para cada contexto de trabajo. En este estudio se evalúan los porcentajes de retención de la barrera. Por último, se apunta a esclarecer algunos supuestos sobre la barrera hechos a priori. Puntualmente, se busca dar claridad sobre si el uso de muy altas presiones es contraproducente para la retención de residuos.

5.2. Descripción del prototipo

El sistema generador de burbujas está compuesto por un tubo de PVC flexible de 2 pulgadas que contiene perforaciones de 1 mm de diámetro con un espaciamiento de 30 mm ¹. El aire se inyecta a presión en el tubo mediante un compresor recíprocante Toyaki modelo TK-50L TANK de 3HP. Para medir el caudal de aire se incluye un caudalímetro de turbina, para realizar las medidas de presión un micromanómetro digital y una válvula de aguja para lograr una regulación precisa del caudal. Sin embargo, únicamente se reportan datos de caudal de aire en la tercer etapa de este ensayo debido a un error en el instrumento que se explica en el Anexo A.

Se requiere un contrapeso para mantener el tubo con orificios en el fondo del canal durante el funcionamiento. Este consiste en un tubo de PVC flexible de 2,3 m relleno con arena y dos piezas de hierro de 5,4 kg y 3,9 kg ubicadas a los costados de la línea de aire.



Figura 5.1: Tubo perforado

5.3. Ensayo del prototipo con agua en reposo

5.3.1. Objetivos

Antes de realizar el ensayo en el canal de hormigón, se replica el análisis realizado en la sección 4, pero ahora, utilizando como dispositivo de salida de las burbujas el tubo de PVC flexible que será el utilizado en el ensayo del canal de hormigón. A su vez, las corridas para este nuevo ensayo se realizan con las mismas presiones que se manejan a la hora de detener los residuos en la segunda y tercer etapa de este ensayo. Esto permite verificar las conclusiones obtenidas en el ensayo anterior y a su vez determinar los parámetros más relevantes para esta nueva barrera.

¹Se opta por una separación de 30mm en lugar de la ensayada en el ensayo de caracterización 4 de 38mm dado que el tubo a utilizar presenta un blindaje plástico en forma de espiral que no permite perforar el tubo cada 38mm. Las separaciones que resultan disponibles se encuentran cada 10mm y se opta por una separación de 30mm en vez de una de 40mm teniendo en cuenta que separaciones menores aumentan la densidad de burbujas de la malla, lo cual se sabe es beneficioso para la retención

5.3.2. Descripción

Para la realización de este ensayo se replica el banco de ensayo realizado para el estudio de caracterización inicial, pero ahora se utiliza el tubo de PVC flexible en vez del dispositivo en forma de L.

Se muestra a continuación imágenes tomadas del ensayo.

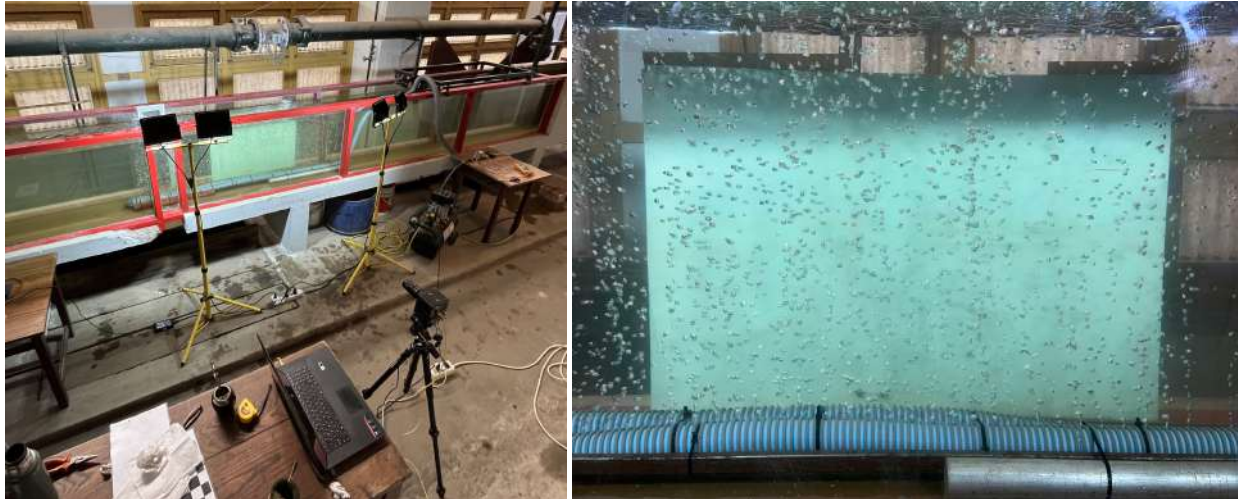


Figura 5.2: Banco de ensayos tubo PVC flexible con agua en reposo

Nuevamente se utiliza la cámara de alta velocidad para poder estudiar los parámetros que caracterizan a la barrera.

Para este nuevo ensayo se estudia el comportamiento de la barrera para las presiones de 65, 80, 100, 150 y 195 mbar. Cabe mencionar que el hecho del uso de distintas presiones para este ensayo en relación a las utilizadas en el ensayo de caracterización radica en que el compresor utilizado no alcanza presiones mayores a 195 mbar para este nuevo dispositivo de salida de burbujas debido a su largo y cantidad de orificios.

5.3.3. Análisis de Resultados

Velocidad de ascenso

Se observa nuevamente que la velocidad de ascenso aumenta de manera relativamente proporcional con la presión, este es el mismo comportamiento que se observa para el ensayo inicial con el dispositivo en “L” 3.1.3.

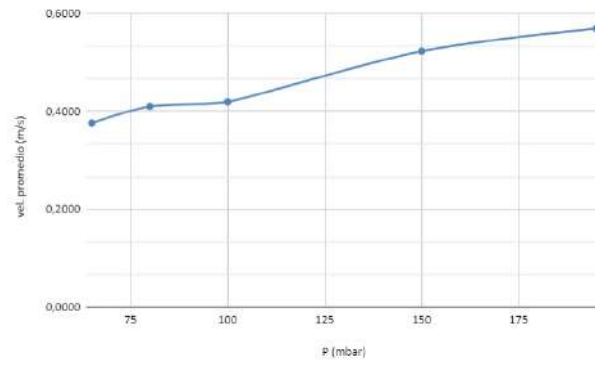
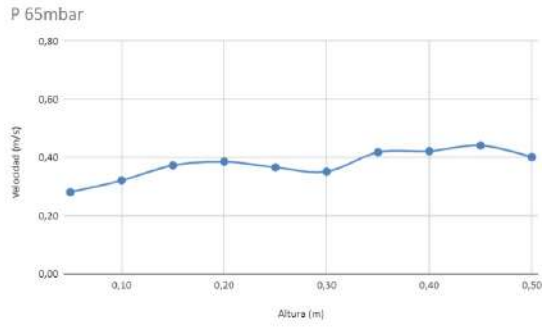
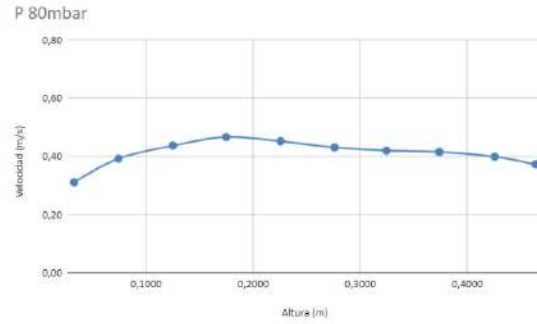


Figura 5.3: Velocidades de ascenso en función de P

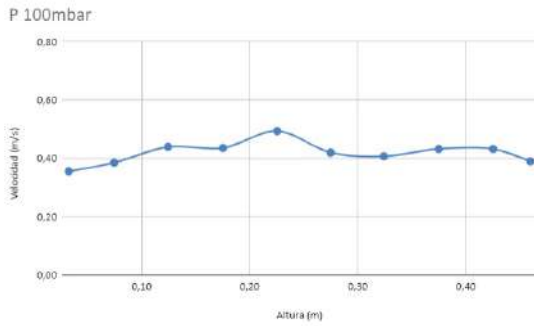
La figura 5.3 muestra la tendencia mencionada.



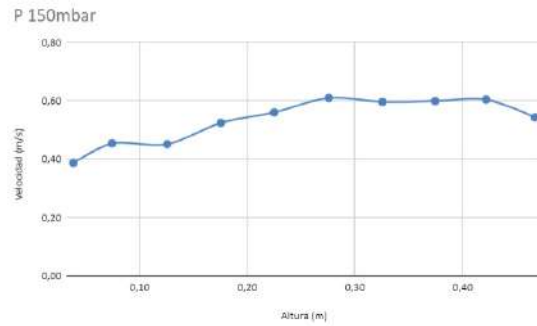
(a) Presión de aire 65 mbar



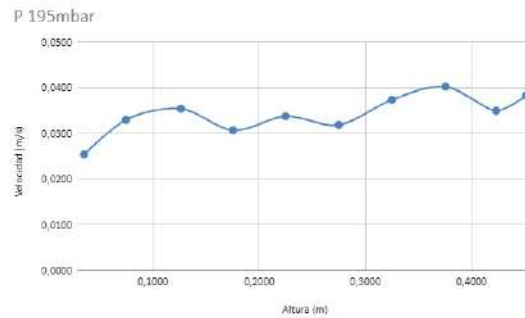
(b) Presión de aire 80 mbar



(c) Presión de aire 100 mbar



(d) Presión de aire 150 mbar



(e) Presión de aire 195 mbar

Figura 5.4: Velocidad de ascenso en función de altura

Evaluando cada configuración de manera puntual, nuevamente se observa que las velocidades se mantienen relativamente constantes a lo largo de todo el recorrido, como se puede ver en la figura 5.4. Esto se condice con el comportamiento descrito por Miyagi [Miyagi, 1929] del que se habla en el capítulo 4, ensayo de caracterización, donde se menciona que las burbujas al salir del orificio alcanzan rápidamente su velocidad terminal.

Frecuencia de salida

Se trata de determinar la frecuencia de salida de burbujas pero no es posible medir la frecuencia de salida de estas inclusive con la velocidad de cámara lenta a 500fps. Esto se debe a que en la salida del orificio

no se logra identificar burbujas individuales, sino que se detecta la presencia de un flujo de aire continuo que en determinado punto se fragmenta para dar lugar a la formación de cada burbuja. Posteriormente estas se fragmentaban formando múltiples burbujas de menor tamaño, por lo que no se reportan datos relativos a la frecuencia de salida.

Densidad de la barrera

Por último se realiza una medición de la densidad de burbujas en la barrera para las distintas configuraciones de presión. Separando nuevamente el plano de estudio en tres zonas: baja, media y alta se obtiene el resultado de la 5.5.

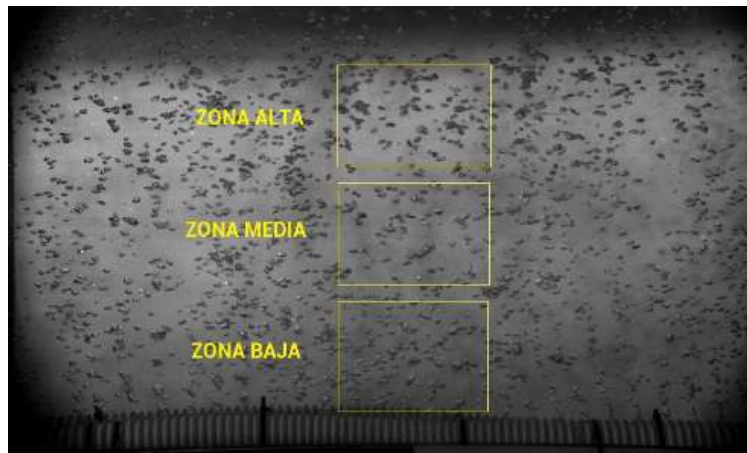


Figura 5.5: Zonas densidad de barrera

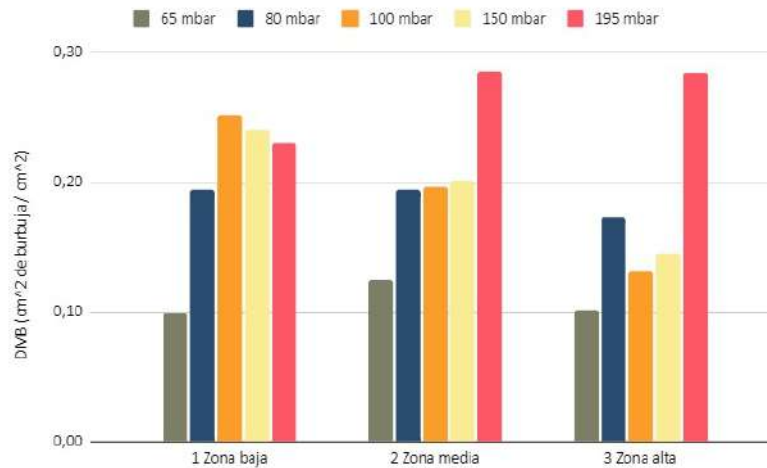


Figura 5.6: Densidad de malla de burbujas

Como se observa en la figura 5.6, por un lado el resultado es consistente con la tendencia reportada en el ensayo anterior, ya que se observa que la densidad de malla de burbujas (DMB) aumenta con la presión.

Por otro lado, a diferencia del ensayo anterior, no se observa un aumento de la DMB con la altura. Esto se adjudica al uso de menores presiones, lo que reduce la turbulencia en la zona superior.

Observación cualitativa: Si bien la densidad de malla de burbujas aumenta con la presión, a presiones altas se observan más “huecos” en la barrera, o sea que la distribución de burbujas es menos uniforme.

5.3.4. Conclusiones del ensayo en el canal de vidrio

Se concluye en este ensayo en base a los tres parámetros analizados. Como se menciona con anterioridad, la velocidad de ascenso de las burbujas aumenta en función de la presión en el tubo y a su vez se destaca que para una misma presión, la velocidad se mantiene constante en todo su recorrido de ascenso.

Respecto a la densidad de la malla de la barrera, se concluye que el comportamiento es similar al ensayado en la configuración de tubo en L, la densidad de la malla de burbujas aumenta con el aumento de presión.

5.4. Ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos variados

5.4.1. Objetivo

En esta fase del ensayo, el objetivo es examinar la conducta de la barrera ante la presencia de desechos que podrían hallarse en cualquier ambiente urbano, con el fin de medir la capacidad de retención de la barrera mediante la simulación de las condiciones a las que estaría sometida una vez implementada.

5.4.2. Metodología

Se presume que la barrera de burbujas puede tener una efectividad de retención variable. Dicha variabilidad depende, a grandes rasgos, de la sintonización del funcionamiento del sistema frente a las condiciones del entorno. Con el fin de determinar precisamente cuáles son los factores que influyen en la capacidad de retención y cuán importante es cada uno, se comienza por clasificarlos en dos grupos. Por un lado están los parámetros del sistema, que son características intrínsecas de la barrera que hacen a su funcionamiento y que es posible regular. Por otro lado están los parámetros del entorno, que son aquellas variables que no son controlables y que dependen exclusivamente del entorno. Estas determinan las condiciones a las cuales se enfrentará la barrera para lograr la retención de los residuos.

Como parámetros del sistema se consideran las siguientes variables:

- Presión de aire
- Espaciamiento entre orificios

- Diámetro de orificios
- Disposición de orificios (disposición unilateral o bilateral)

Por otro lado, como parámetros del entorno, se consideran las siguientes variables:

- Tirante del cauce de agua
- Velocidad del agua
- Forma y composición de los residuos

Con el fin de establecer una meta alcanzable para este primer ensayo del prototipo, se hace foco en el análisis de algunos de los parámetros mencionados. Manteniendo el resto de los parámetros fijos, se varía el parámetro de interés. De este modo, se logra detectar el efecto individual sobre el sistema que produce el cambio en esa variable. Los parámetros en los que se enfoca este ensayo son:

- Presión de aire
- Tirante del cauce de agua
- Velocidad del agua
- Forma y composición de los residuos

Esto es posible gracias al entorno controlado que se describe en la sección descripción del banco de ensayos, que permite regular tanto los parámetros del sistema como los parámetros del entorno. En este caso, los parámetros que refieren a la conformación estructural de la barrera (diámetro, separación y disposición de los orificios) son fijos a lo largo de todo el ensayo. De este modo queda como única variable manipulable del sistema la presión del aire. Entonces, fijada una configuración de las variables del entorno, las diferentes corridas consisten en variar la presión de aire del sistema y observar la cantidad de residuos que se logra retener.

5.4.3. Descripción

El prototipo descrito en la sección 5.2 se ubica en el lecho de un canal de agua con una inclinación aproximada de 45° respecto a su sección transversal, como se observa en la figura 5.7a. El canal de estudio es rectangular, con un ancho de 1,5 m y una altura de 0,79 m, y se llena con agua hasta el nivel requerido mediante el control de una compuerta.

Se controla el caudal y el nivel del agua para determinar la velocidad del flujo. Para cada condición de velocidad de agua, se varía la presión del aire inyectado a través del compresor, y se evalúa la capacidad de la barrera para retener los residuos sólidos. Para ello, se utiliza un calderín situado en la orilla de recolección, y se consideran “retenidos” a todos los residuos que quedan atrapados en el calderín. Este

ensayo se registra mediante una filmación cenital con una cámara GoPro colocada en el techo. A continuación se muestran dos imágenes, una con el canal vacío y otra con el canal lleno de agua y el sistema en funcionamiento.



(a) Canal vacío

(b) Canal con residuos

Figura 5.7: Canal de hormigón para ensayo del prototipo

En la figura 5.7a se presenta el canal vacío y puede observarse el sistema de contrapeso utilizado en el ensayo del prototipo para mantener el tubo aplomado al fondo del canal. La 5.7b muestra el canal con agua y el sistema ya en funcionamiento reteniendo los residuos que se acercan a la barrera. Se observa con claridad cómo gracias a la inclinación de la barrera los residuos son redirigidos siguiendo el sentido de la misma hacia la red de recolección.

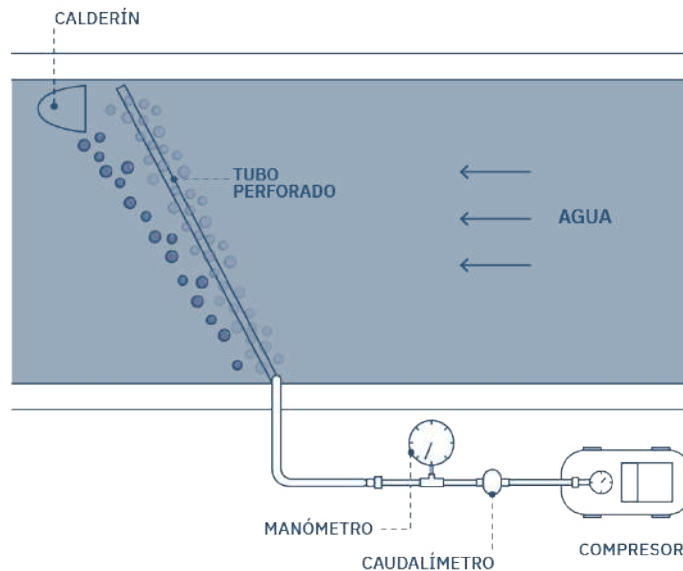


Figura 5.8: Diagrama del banco de ensayos.

En este estudio se examina el comportamiento de la barrera bajo distintas condiciones, tanto de flujo de agua como presiones de aire. Se varían los parámetros controlados: H (Tirante de agua), Q (Caudal de agua), P (Presión de aire); y en función de la variación de dichos parámetros se analiza el comportamiento de la barrera y su capacidad de retención. Para esto se utilizan residuos de distintas características, los cuales se presentan en la figura 5.9.



Figura 5.9: Residuos utilizados durante el ensayo

Consideraciones respecto a la presión

De acuerdo con las recomendaciones de [Mascha and Christensen, 1983], se debe garantizar un funcionamiento óptimo del tubo mediante la eliminación del agua de su interior y el establecimiento de presiones mínimas de trabajo que aseguren un flujo relativamente constante para todas las salidas de aire.

Al colocar el tubo en el canal con el compresor apagado, este se llena de agua debido a las presiones del agua circundante. Es crucial para la eficiencia del sistema que, en el funcionamiento estacionario, el tubo se encuentre completamente lleno de aire. De lo contrario, si contiene agua, al encender el compresor, el agua puede acumularse en el tramo final, tapando los últimos orificios y acortando de esa manera el largo efectivo del tubo. Existen diversos métodos para realizar el vaciado del agua, incluyendo la colocación de orificios de descarga con un diámetro doble al de los orificios regulares de salida de aire en la parte inferior del tubo o como se utiliza en este ensayo, se elevan las presiones para eliminar el contenido de agua del tubo. Cabe destacar que este método solo es efectivo para tubos de hasta 10 metros de longitud, y se deben considerar otras alternativas para longitudes mayores.

En este ensayo, se sigue un procedimiento visual para determinar la presión mínima de trabajo. Después de colocar el tubo (lleno de agua), se comienza a aumentar gradualmente la presión hasta que se observa que todos los orificios descargan aire a una intensidad similar. Esta presión se define como la presión mínima de trabajo, y se asume que el tubo está lleno de aire y que la presión es relativamente constante en toda su longitud.

5.4.4. Análisis de resultados

Efecto de la velocidad del agua

A partir de los resultados obtenidos es posible identificar que los distintos parámetros controlados para la realización de este ensayo repercuten sobre la efectividad de la barrera.

Si bien se observa una retención mayor al 80 % en la mayoría de las configuraciones, se destaca que a mayores velocidades de flujo de agua aumenta la dificultad para retener residuos.

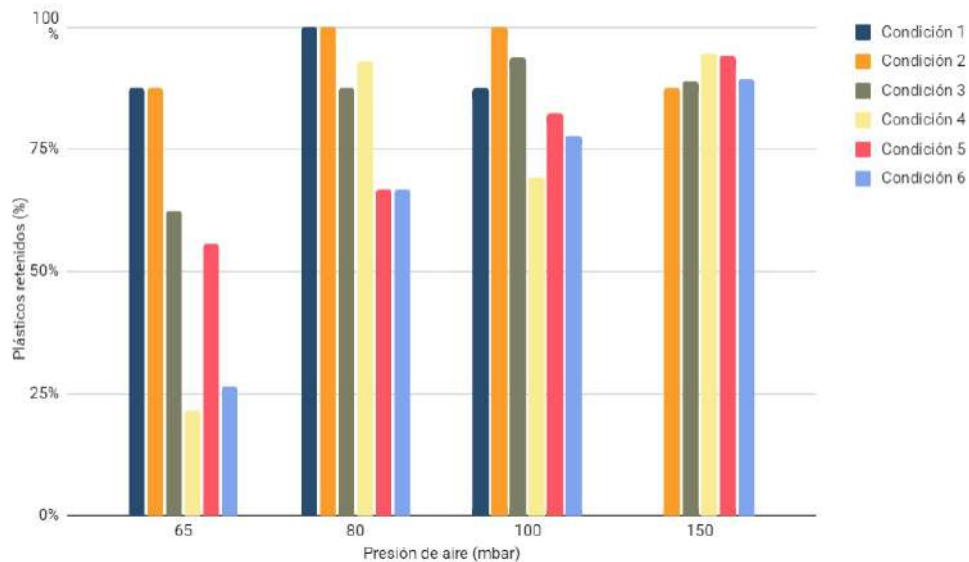


Figura 5.10: Porcentaje de plásticos retenidos en función de la presión de aire inyectada para las distintas condiciones de trabajo. Datos relevados en el Canal de Hormigón del IMFIA.

	Caudal de agua (m ³ /s)	Velocidad de agua (m/s)	Tirante (m)
Condición 1	0,0638	0,077	0,55
Condición 2	0,0935	0,113	0,55
Condición 3	0,1159	0,14	0,55
Condición 4	0,1171	0,182	0,43
Condición 5	0,0780	0,163	0,31
Condición 6	0,1376	0,175	0,53

Figura 5.11: Condiciones de trabajo.

Efecto de la presión

La presión aplicada en la barrera tiene un efecto significativo en la retención de residuos plásticos en el agua; se requiere una presión específica para cada velocidad de agua con el fin de optimizar la captura de residuos.

Los resultados experimentales indican que, en general, para diferentes velocidades de agua, las altas

presiones de la barrera tienen un mejor desempeño en términos de la retención de residuos (lo cual se puede observar especialmente en la corrida n°7). Aun así, es importante destacar que debido a la limitación de la capacidad del compresor, no fue posible alcanzar presiones por encima de los 195 mbar.

Capacidad de retención

A partir de este ensayo se pueden identificar dos fenómenos que afectan la retención de sólidos y deben ser abordados para mejorar la eficacia de la barrera.

En primer lugar, se observa que la barrera no es capaz de detener los residuos que no se desplazan a nivel superficial. Este fenómeno se manifiesta claramente en las configuraciones que se logra retener el 100 % de los sólidos superficiales, pero no se consigue el mismo éxito con los residuos que viajan a media altura. Esto se observa claramente en la corrida n°2, donde no se obtiene una retención del 100 % debido a que los sólidos que viajan a media altura no logran ser retenidos, mientras que la totalidad de los superficiales sí. La explicación de este resultado se puede encontrar en la sección 3.2.2. A profundidades mayores a h (medido desde la superficie) no se genera un flujo contrario capaz de contrarrestar la velocidad del agua, entonces la única forma de lograr la retención de estos cuerpos es que el tiempo que tardan en atravesar la barrera sea mayor al que tardan en elevarse (debido al flujo ascendente inducido) hasta atravesar el punto de inflexión de profundidad h . Este tiempo de ascenso podría reducirse si se aumenta la velocidad de las burbujas inyectando el aire a mayor presión. Este fenómeno es de suma importancia, por lo que se realizan nuevos estudios con el objetivo de determinar el comportamiento de la barrera con los sólidos que no viajan a nivel superficial. Este estudio se presenta en la sección 5.5.

El segundo fenómeno que se observa en este ensayo es la dificultad que presenta la barrera para detener objetos con alta masa y movimiento, aun cuando viajan a nivel superficial. Se ha comprobado que en la mayoría de los casos, estos objetos representan un reto para la barrera, siendo solo algunas configuraciones capaces de detenerlos. Este comportamiento puede ser explicado por la interacción entre la cantidad de movimiento del objeto y la del agua, que influye en la fuerza de arrastre que actúa sobre el objeto y en la capacidad de la barrera para retenerlo. Al ser la fuerza de arrastre un factor determinante en cuanto a la capacidad de retención de la barrera, la forma del objeto será también de suma importancia.

Se presentan a continuación imágenes de las distintas configuraciones ensayadas. Los números sobre las imágenes indican la secuencia de las fotos en el tiempo. La corriente en la figuras se dirige en dirección descendente.

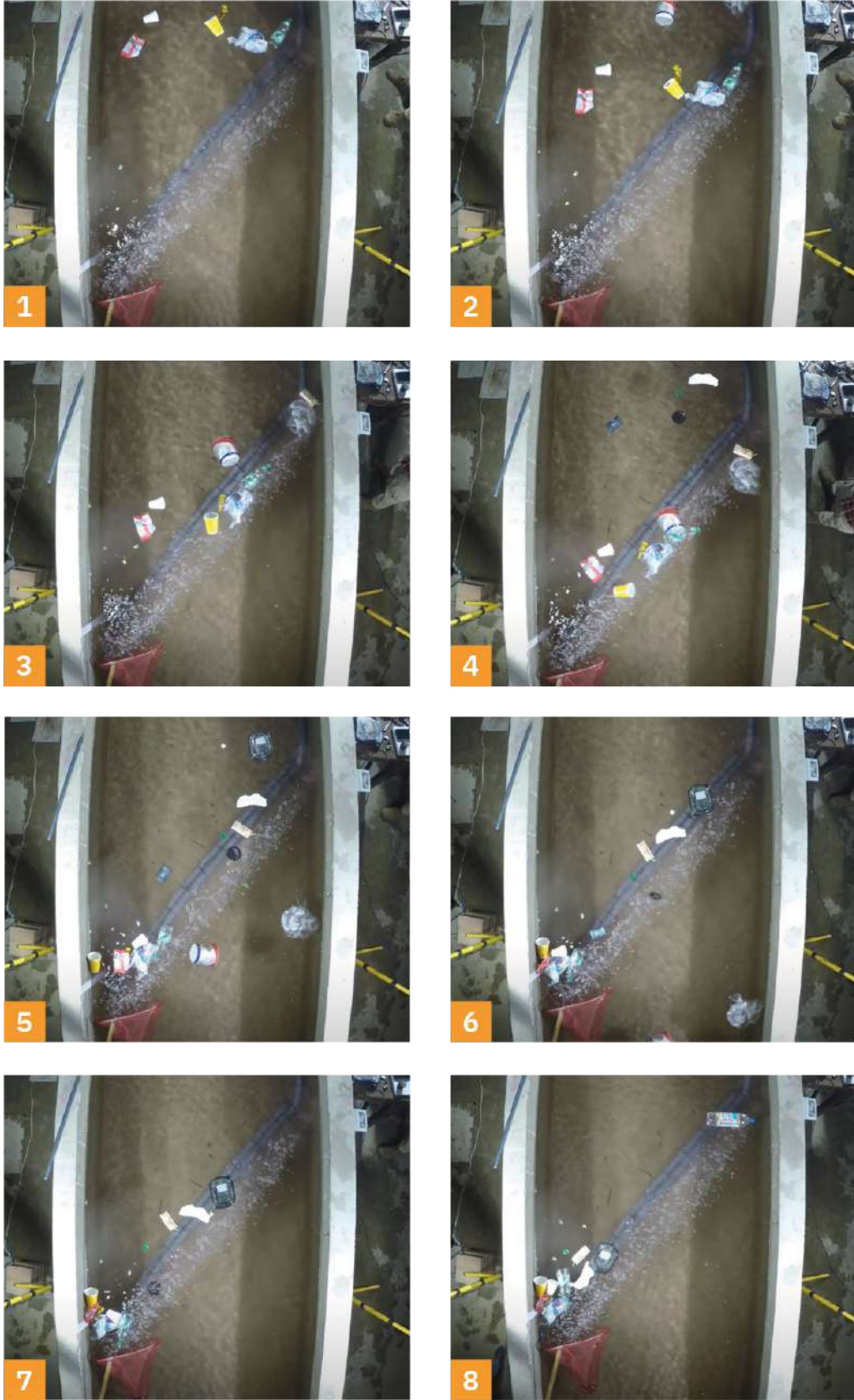


Figura 5.12: Presión 65mbar, caudal de agua 93,5L/s

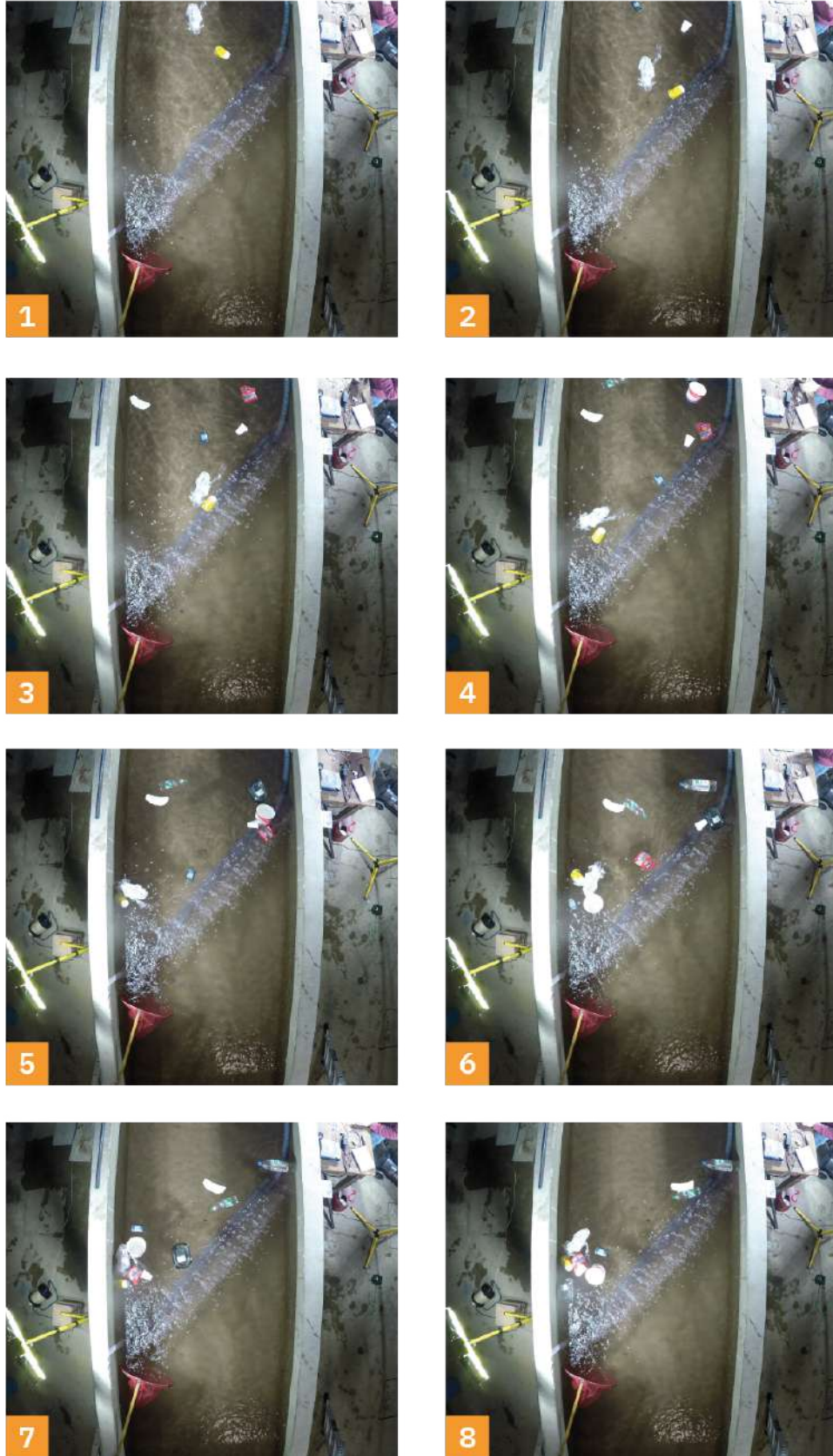


Figura 5.13: Presión 80 mbar, caudal de agua 63,8L/s

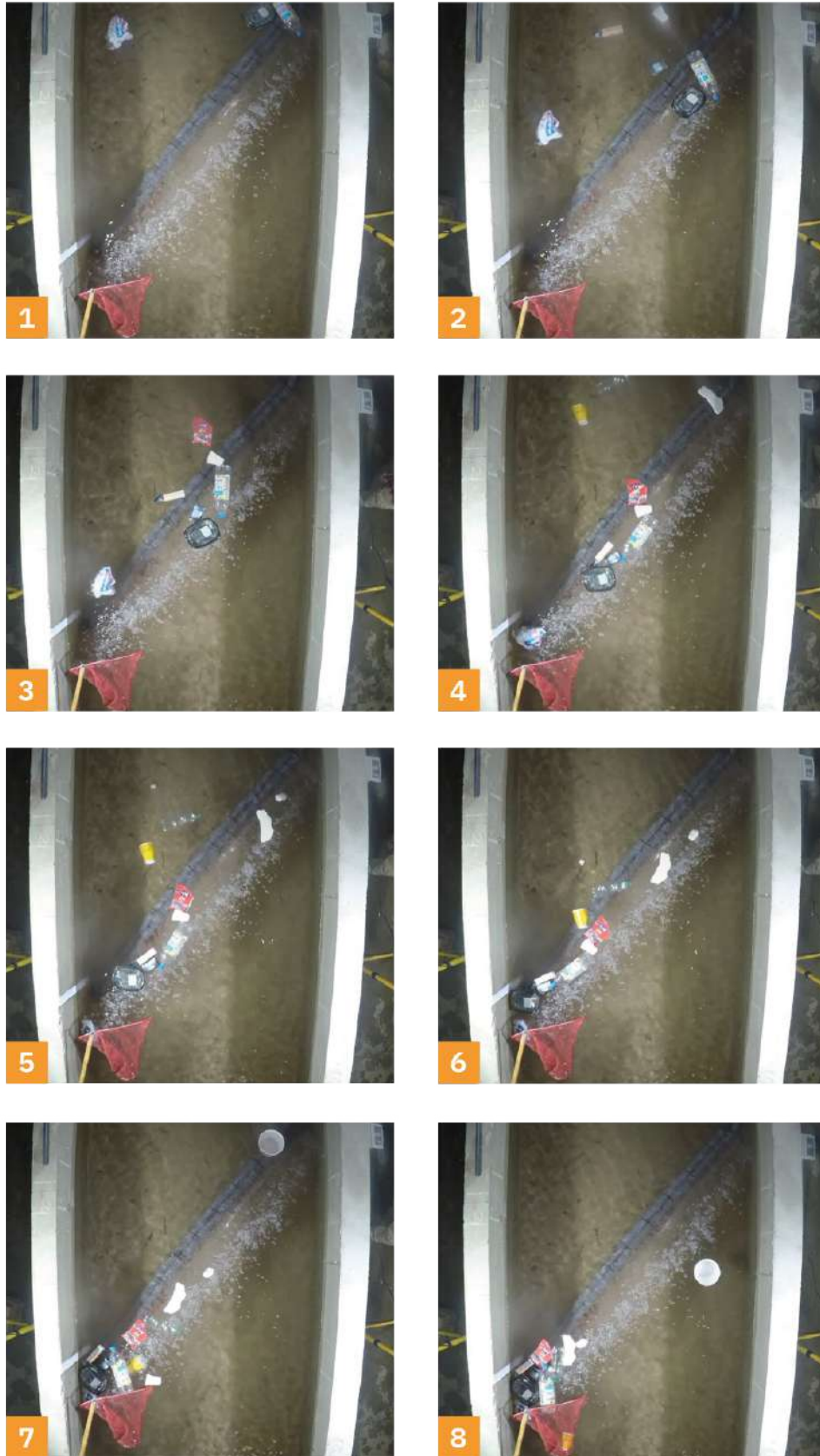


Figura 5.14: Presión 80 mbar, caudal de agua 117L/s

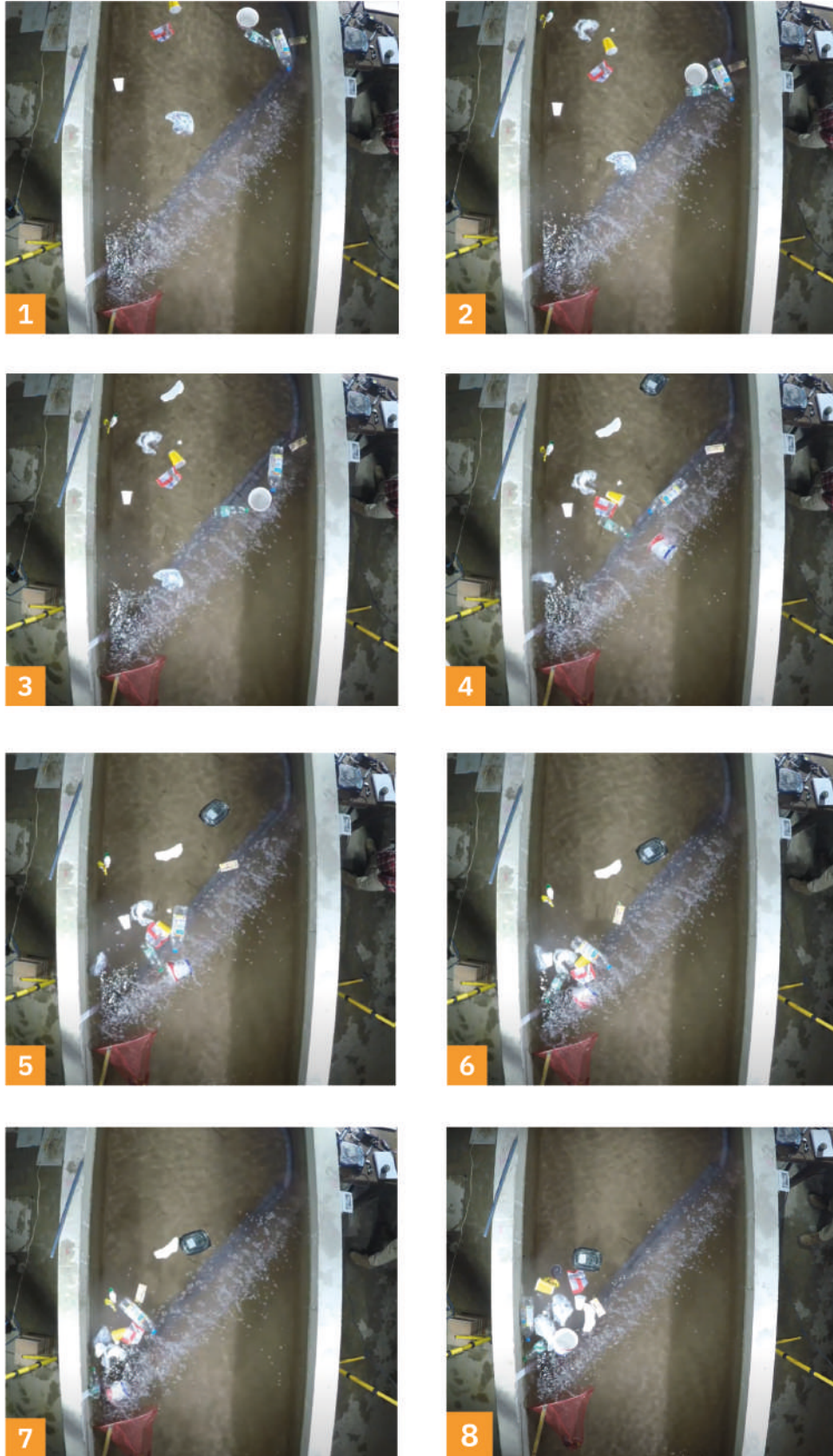


Figura 5.15: Presión 100 mbar, caudal de agua 93,5L/s

5.4.5. Conclusiones del ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos variados

En primer lugar, se verifica que el punto de operación necesario para que la barrera sea efectiva depende estrechamente de las condiciones del entorno. En el rango de presiones ensayadas, cuando se logra una correcta sintonización entre los parámetros del entorno y del sistema, se observa que la barrera presenta una buena efectividad en la retención de plásticos. Se evidencia que la capacidad de retención aumenta a medida que la presión crece.

La barrera presenta una alta efectividad respecto a la retención de plásticos que se aproximan a nivel superficial y no tanto así para aquellos que transitan sumergidos. Se destaca principalmente la efectividad en la retención de residuos livianos como botellas, bolsas y bandejas plásticas. Por el contrario, objetos más pesados, como fue el caso del balde lleno de agua, acompañados de altas velocidades prueban presentar una mayor dificultad para la barrera.

5.5. Ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades

5.5.1. Objetivo

Se realiza un segundo ensayo donde se estudia el comportamiento de la barrera en cuanto a la retención de sólidos pero en este estudio se utilizan sólidos de una misma forma con distintas densidades. El objetivo de este ensayo es poder cuantificar la efectividad de la barrera en función de la densidad del residuo. El banco de ensayos es análogo al descrito en la sección 5.2 pero cabe destacar que para este ensayo el error que provocaba el caudalímetro ya se encuentra corregido (ver Anexo A), por lo que las medidas de caudal obtenidas resultan confiables y se declaran con el resto de los datos en el Anexo B.

Inicialmente este ensayo se planteó con el objetivo de determinar la efectividad de la barrera para detener residuos que viajan a distintas alturas pero, por motivos que se explicarán más adelante, el objetivo migra a la evaluación de la retención de sólidos en función de la densidad.

Para los sólidos de una misma forma pero con distinta densidad, se procede con el uso de cuerpos plásticos esféricos (pelotas de tenis de mesa) las cuales se colocan en el canal llenas de aire, agua y con una solución de salmuera saturada.

Se toma una muestra de 15 esferas y se fracciona en grupos iguales para las distintas densidades. Se define un nivel y un caudal para de esa manera variar la velocidad del flujo de agua y las presiones del compresor, para identificar los distintos rendimientos de la barrera de burbujas.

Se clasifica como sólido retenido a aquel que culmina en el sistema de recolección.

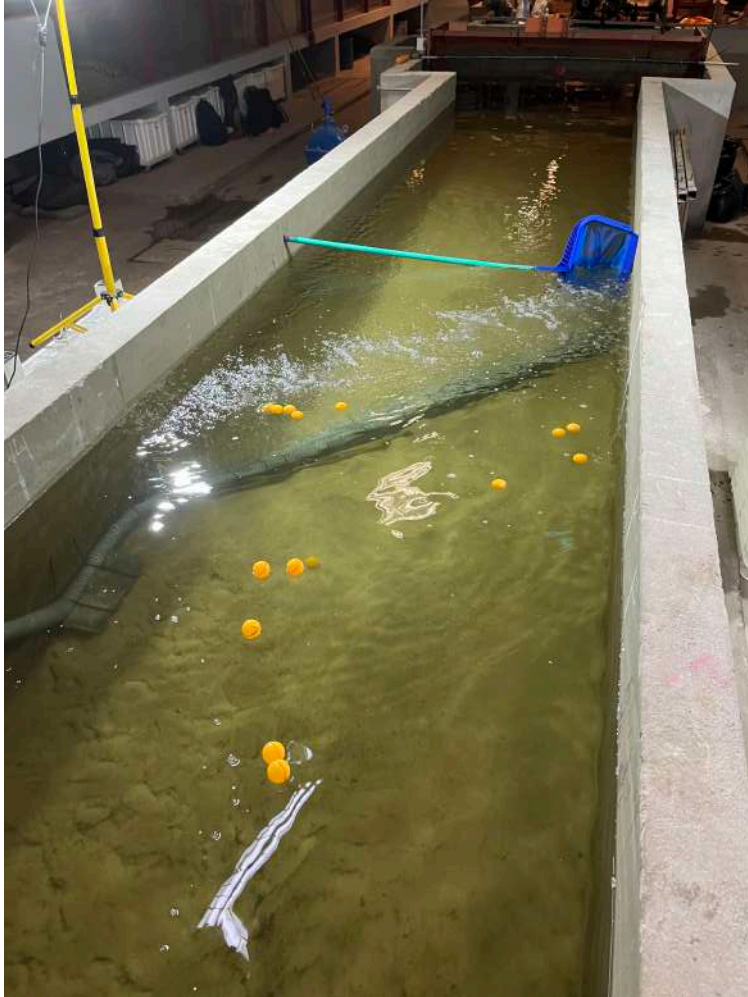


Figura 5.16: Canal con sólidos esféricos de distinta densidad

Sólidos

Para lograr que los sólidos alcancen distinta masa se les inyecta agua utilizando una jeringa. De esta forma se obtienen tres sólidos de distinta densidad. Unas son pelotas de ping-pong rellenas de aire, otras rellenas de agua y otras rellenas de agua con sal. Una vez llenas, se mide la masa de las mismas para obtener su densidad.



Figura 5.17: Sólidos esféricos de distinta densidad. Se tienen tres fluidos de relleno: agua (H_2O), aire (A) y salmuera (S).

5.5.2. Descripción del ensayo

Para este ensayo nuevamente se consideran los parámetros de presión, tirante y caudal. Se varía de manera de obtener las distintas configuraciones estudiadas. Para un caudal y tirante fijo se varía la presión. De esa manera, se construye una tabla con la capacidad de retención para cada una de las presiones en las distintas configuraciones del cauce.

Como se indica en la introducción de este ensayo, el objetivo original de determinar la efectividad de la barrera para sólidos que viajan a diferentes alturas tuvo que ser reformulado. Esto se debe a la imposibilidad de encontrar un sólido con la misma densidad que el agua para que, de esa forma, pudiera ser ubicado a una altura específica y mantenerse allí hasta llegar a la barrera.

Inicialmente se intentó llenar completamente las esferas plásticas con agua, pero la diferencia de densidad en la capa plástica fue suficiente para mantener las esferas a flote. Luego se intentó llenar las esferas con un líquido más denso que el agua, utilizando agua saturada con sal para equiparar las densidades, pero esto tampoco dio resultados satisfactorios. Variaciones mínimas en el nivel del agua con sal llevaron a que las esferas se ubicaran a flote o a nivel del fondo.

No obstante, este fenómeno puede ser considerado como algo positivo, ya que sugiere que la gran mayoría de los residuos que viajan en un curso de agua se encuentran a nivel de fondo o superficial, en lugar de a alturas intermedias, siendo los primeros los que con mayor facilidad se trasladan hasta la barrera.

Debido a este resultado obtenido, se ensaya cómo las distintas densidades para una misma configura-

ción geométrica impactan en la capacidad de retención de la barrera.

Se masan las esferas plásticas y se contabilizan aquellas que en cierta configuración no son retenidas por el sistema.

Se presenta a continuación una vista superior al momento de realizar el ensayo.

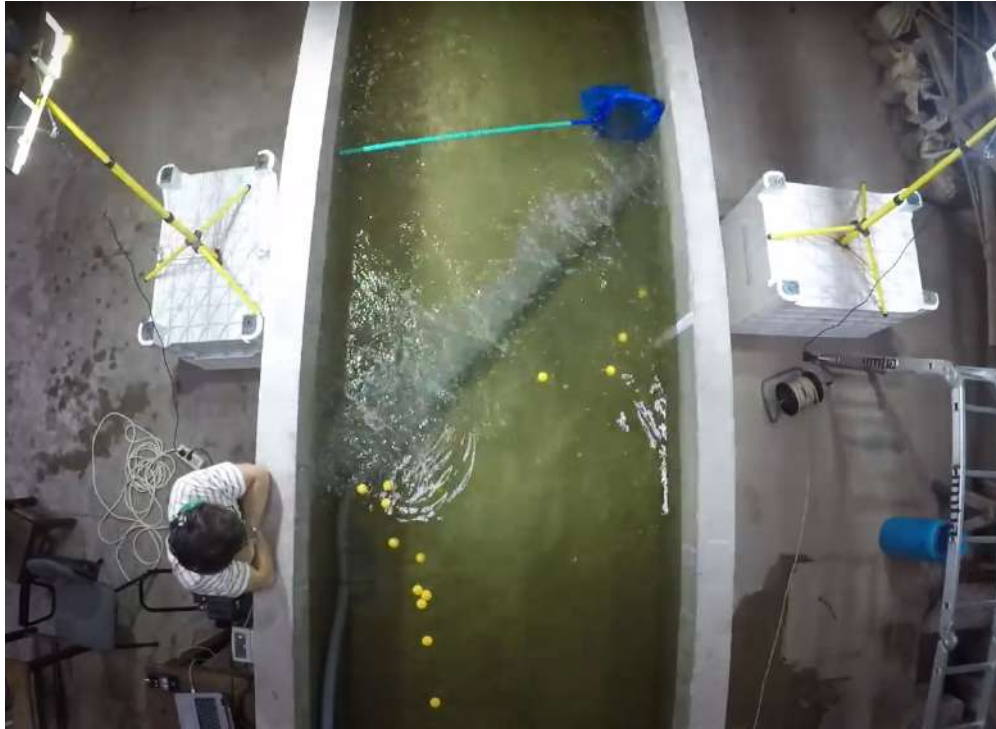


Figura 5.18: Canal de hormigón con residuos uniformes de distinta densidad

5.5.3. Análisis de resultados

Se procede con el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo. Se observa qué porcentaje de plásticos logra ser retenido en cada una de las configuraciones estudiadas. A continuación se presenta el gráfico de porcentaje de plásticos retenidos en función de la presión, para las distintas configuraciones.

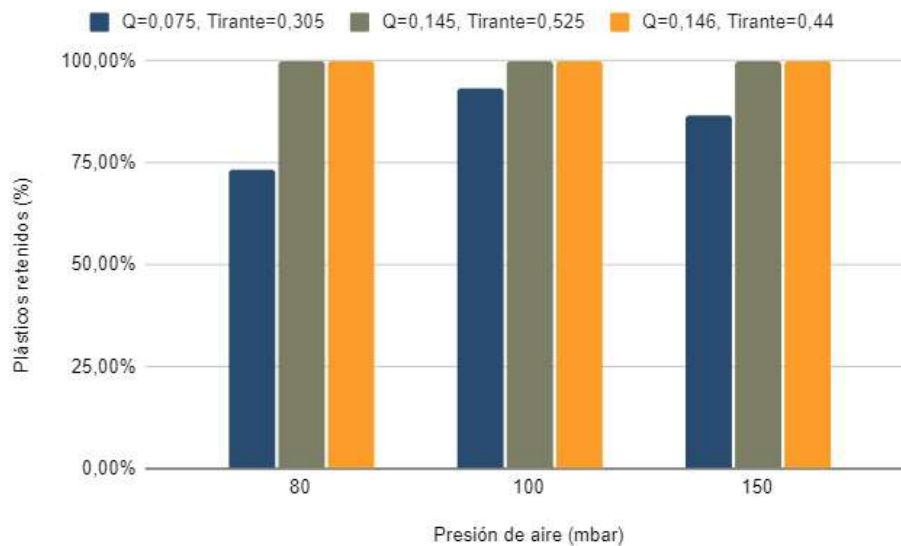


Figura 5.19: Plásticos de distinta densidad retenidos.

Para dos de las configuraciones es posible observar que la barrera es capaz de retener el 100 % de los plásticos. Esto no ocurre para la condición de menor tirante, donde si bien no se retiene la totalidad de los residuos, se obtiene un alto porcentaje de retención.

Se presenta a continuación la gráfica de los plásticos que logran atravesar la barrera para la condición de 0,30 m de tirante y una velocidad del flujo de 0,16 m/s.

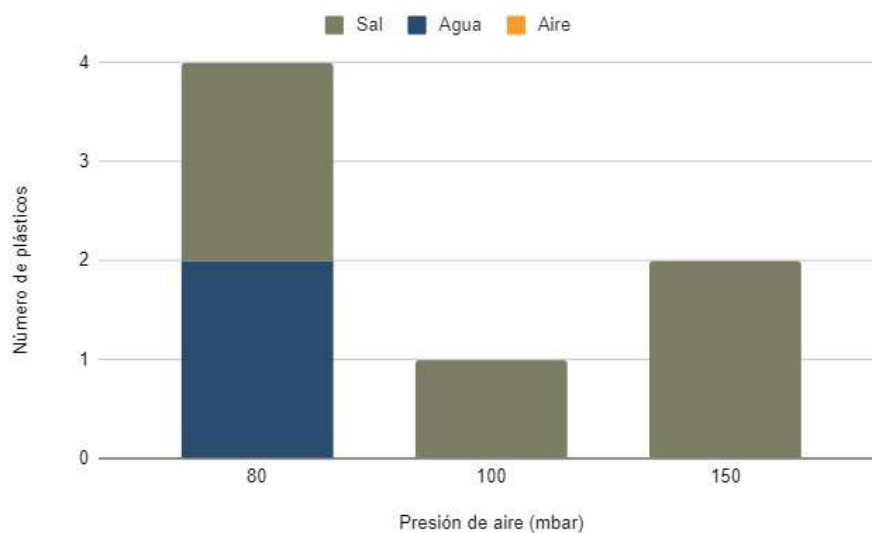


Figura 5.20: Plásticos que superan la barrera, distinta densidad.

A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer dos resultados: el primero es que, tal como se observa en el primer ensayo, es más probable que los objetos con mayor cantidad de movimiento atravie-

sen la barrera. Esta cantidad de movimiento es igual a la masa del objeto multiplicada por su velocidad, lo cual implica que los cuerpos que se mueven con una mayor cantidad de energía cinética son mas difíciles de detener. En segundo lugar, se observa que la primer configuración si bien corresponde a la de menor velocidad, fue la única configuración que no logró alcanzar una efectividad del 100 %. Se puede observar que esta configuración es la de menor nivel de agua ensayado, de lo que se desprende la importancia de tener en cuenta el valor del tirante en la instalación de una barrera de burbujas ya que por debajo de cierto valor mínimo comienza a ser negativo para la retención.

A su vez, esta dificultad para retener los solidos que no viajan a nivel superficial se presenta como un beneficio en cuenta a la poca distorsión que generarían para el pasaje de la fauna marina.

A continuación se presenta, a modo ilustrativo, una secuencia de ensayo:

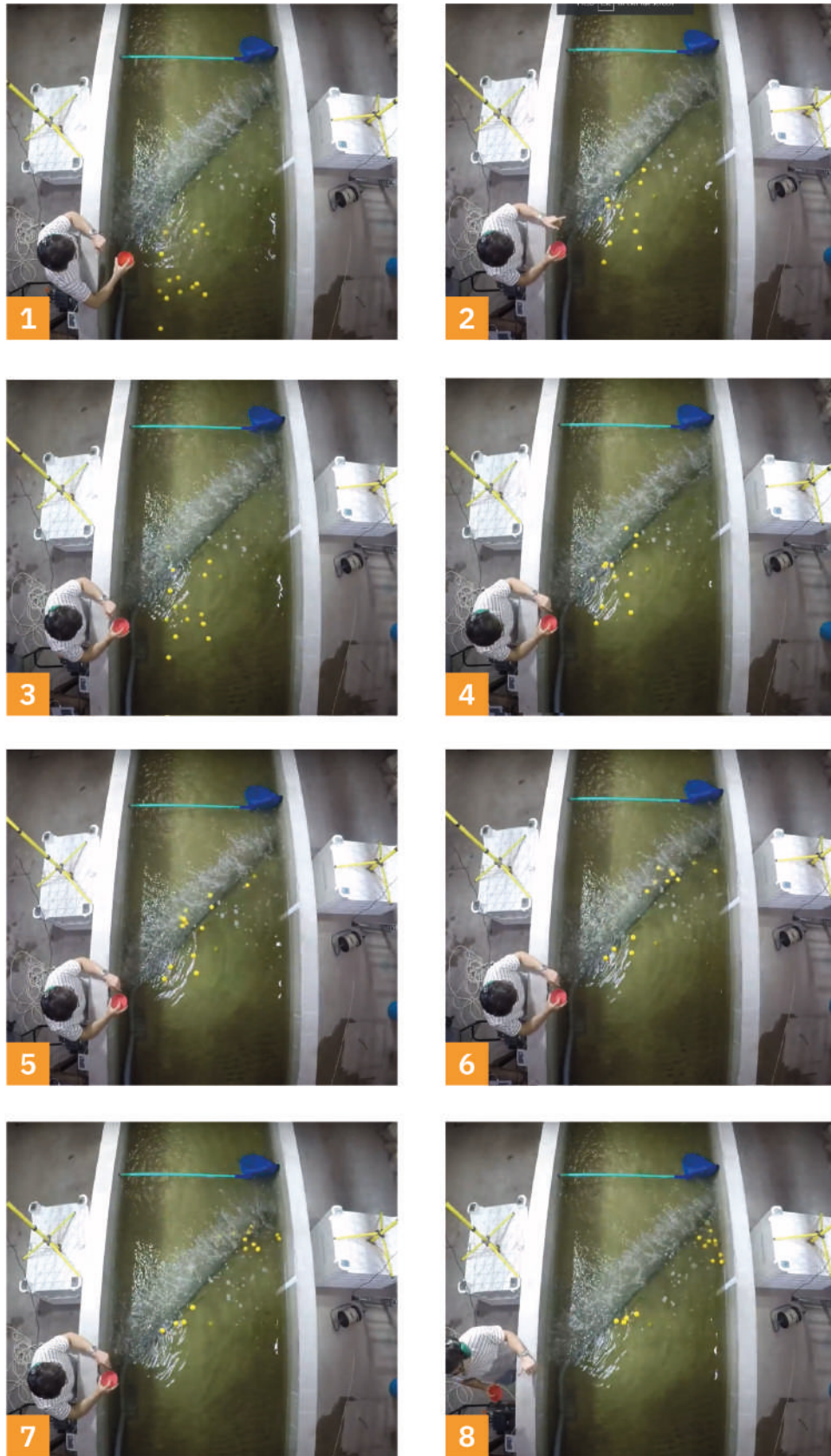


Figura 5.21: Presión 150 mbar, caudal de agua 146 L/s.

Cálculo del coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga (C_d) es un valor adimensionado que establece la relación entre el caudal real de un fluido que fluye a través de un orificio bajo ciertas condiciones y el caudal teórico que pasaría a través del mismo orificio en condiciones ideales, es decir, sin perturbaciones en el flujo. Este depende del caudal que fluye a través del orificio, de la diferencia de presión entre el lado aguas arriba y aguas abajo del mismo, y de su geometría. La bibliografía [Flow, 2015] presenta la relación de estos parámetros mediante la siguiente ecuación:

$$Q_1 = C_d Y A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_1(1 - \beta^4)}} \quad (5.5.1)$$

Donde Q_1 es el caudal que fluye a través del orificio, P_1 y P_2 la presión aguas arriba y aguas abajo del orificio respectivamente, A_2 el área del orificio, ρ_1 la densidad del aire en las condiciones de presión y temperatura del orificio, β la relación de diámetros y Y el coeficiente de expansión que se calcula según la siguiente ecuación:

$$Y = \sqrt{r^{\frac{2}{\gamma}} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{1 - r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - r} \right)} \quad (5.5.2)$$

Donde $r = P_2/P_1$ y $\gamma = 1,4$.

De esta manera se calcula el coeficiente de descarga de un orificio de 1 mm de diámetro para las distintas configuraciones ensayadas. Con la presión medida en el manómetro (P_M) (ver figura 5.8) se calcula la presión dentro del tubo (P_1) por medio del cálculo de la pérdida de carga (Bernoulli). Se considera presión constante a lo largo del tubo dado que la pérdida de carga distribuida en su interior resulta despreciable. La presión a la salida del orificio (P_2) queda determinada por la columna de agua. Se considera que el caudal (Q_1) es el mismo para todos los orificios: $Q_1 = \frac{Q_T}{73}$, con Q_T el caudal de aire total que circula por el tubo.

Por medio de la ecuación 5.5.1, se despeja el coeficiente de descarga para cada configuración:

Punto	Nivel (m)	Q _T (m ³ /s)	P _M (Pa)	P ₁ (Pa)	P ₂ (Pa)	r	Y	C _d
1	0,31	0,00127	101810,0	109435,8	104719,0	1,0	0,98	0,26
2	0,31	0,00145	101830,0	111346,5	104719,0	0,9	0,97	0,25
3	0,31	0,00186	101880,0	116099,0	104719,0	0,9	0,95	0,25
4	0,53	0,00095	101810,0	109565,4	106875,0	1,0	0,99	0,25
5	0,53	0,00127	101830,0	111435,8	106875,0	1,0	0,98	0,26
6	0,53	0,00172	101880,0	116190,4	106875,0	0,9	0,96	0,25
7	0,44	0,00109	101810,0	109513,3	106042,0	1,0	0,98	0,25
8	0,44	0,00136	101830,0	111392,7	106042,0	1,0	0,97	0,26
9	0,44	0,00177	101880,0	116158,6	106042,0	0,9	0,95	0,25

Cuadro 5.1: Resultados de coeficiente de descarga

En el cuadro 5.1 se presentan los resultados obtenidos. Puede observarse que, para el rango de caudales estudiado, el coeficiente de descarga se mantiene casi invariado.

Este resultado es de suma relevancia para el dimensionamiento de un sistema de BdB. Dado un prototipo de tubo perforado cuya longitud, diámetro y espaciamiento de orificios son conocidos, asumiendo un $C_d = 0,25$ constante, se puede calcular el caudal de aire necesario de modo de seleccionar el compresor.

5.5.4. Conclusiones ensayo del prototipo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades

Como primera conclusión se presenta la dificultad para lograr que un sólido tenga exactamente la misma densidad que el agua, lo que sugiere que, en un muestreo aleatorio, es poco probable que esto ocurra. Este es un hecho importante debido a que acota en gran medida las posibilidades de que alguno de estos objetos viaje a una altura intermedia del nivel del agua, por lo que, la mayoría de los residuos se encontrarán viajando a nivel superficial o a nivel de fondo, donde a su vez, es menos probable que estos últimos viajen hasta la barrera dado que, al menos para los tiempos de duración del ensayo, estos permanecen estancados en el fondo. Evaluando cómo la masa afecta el poder de retención de la barrera, se determina en esta etapa que los objetos con mayor masa y por lo tanto, mayor cantidad de movimiento, tienen mayores probabilidades de atravesar la barrera. Este es el mismo comportamiento que se observa en la etapa presentada en la sección 5.4.4 de este ensayo, cuando se utilizan residuos variados.

5.6. Conclusiones generales de los ensayos

En términos generales, los resultados del ensayo indican la efectividad de la barrera de burbujas como un método de retención de residuos. La alta eficiencia en la captación de residuos en la mayoría de las configuraciones, evidencia que este sistema puede ser considerado como una alternativa efectiva para reducir la cantidad de residuos que circulan en los cursos de agua y, por consiguiente, que pueden ser arrastrados hasta el océano. En consecuencia, se puede afirmar que la barrera de burbujas se posiciona a la vanguardia entre los sistemas de protección ambiental.

Capítulo 6

Cursos de agua

La primera parte de esta sección describe la situación actual de los cursos de agua visitados. Posteriormente, se abordan los aspectos fundamentales a considerar para la identificación del curso más apropiado para la aplicación de la barrera de burbujas.

6.1. Cursos visitados

Los cursos de agua visitados en el departamento de Montevideo son: el Arroyo Carrasco, el Arroyo Chacarita, el Arroyo Pantanoso, el Arroyo St Brendan's ¹, el Arroyo Miguelete y el Arroyo El Molino. En la figura 6.1 se presenta un mapa con las ubicaciones de los puntos visitados y en la figura 6.2 fotografías de algunos de estos.

¹Se utiliza este nombre como referencia dado que no se encuentra un nombre oficial para este afluente del Arroyo Carrasco.

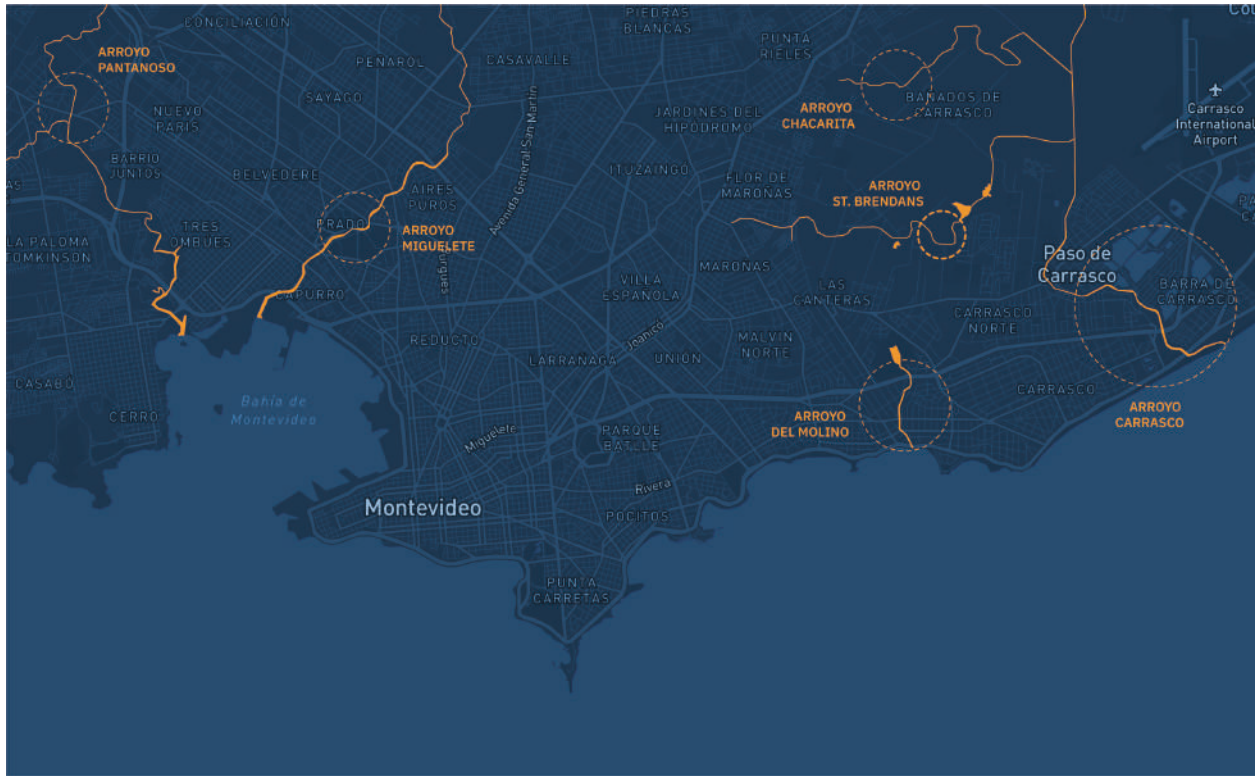


Figura 6.1: Mapa de Montevideo con las ubicaciones de los puntos visitados.



(a) Arroyo Chacarita sobre Cno. Dionisios



(b) Arroyo Chacarita sobre Av. Punta de Rieles



(c) Arroyo Saint Brendan's



(d) Arroyo Carrasco.

Figura 6.2: Imágenes de algunos de los cursos de agua evaluados

La figura 6.2 muestra la criticidad de la situación de algunos de los cursos. Casos como el del Arroyo Chacarita se ven fuertemente afectados por su entorno. En particular, este se encuentra en la periferia de la ciudad, en un contexto donde priman los asentamientos y la presencia de basurales, lo cual deriva inevitablemente en la contaminación del curso de agua.

A continuación se presentan imágenes del entorno del Arroyo Chacarita que hacen referencia a lo mencionado.



Figura 6.3: Entorno del Arroyo Chacarita

Como lo destaca la tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental de Gimena Bentos [Pereira, 2018], la disposición irregular de residuos presenta complejidades que deben ser abordadas desde una perspectiva interdisciplinaria. Se requiere de un apoyo económico para realizar una limpieza inicial a la vez que un enfoque social para reeducar a la población al respecto del tema. Ambos aspectos son fundamentales para, en primer lugar, poder hacer efectiva la aplicación de los sistemas de recolección y, en segundo lugar, permitir la colaboración generalizada por parte de la sociedad con la causa.

6.2. Requisitos y selección del sitio

Primeramente, y como requisito base para la selección del curso, este debe tener presencia de contaminantes sólidos para que la implementación de la barrera cobre sentido. Todos los arroyos visitados cumplen con este punto. En algunos casos, cuando la situación es crítica, basta con la mera observación para determinar que no es suficiente únicamente con un método de retención de residuos a nivel del curso de agua. Para colocar una barrera de burbujas en un curso con estas características se debería realizar previamente una recolección de la basura estancada. Un ejemplo de esta situación es la observada en el Arroyo Chacarita, donde ocurre que por la acumulación de basura la misma se estanca y no fluye a lo largo del curso.



Figura 6.4: Arroyo Chacarita)

En segundo lugar, un parámetro importante a tener en cuenta es la profundidad del curso de agua. Se concluye a partir de los ensayos que a menor tirante, menor es el porcentaje de retención. En particular, se observan casos extremos, como el del Arroyo Pantanoso en la intersección con la Av. José Batlle Berres y el Arroyo del Molino en toda su extensión (figura 6.5), donde el nivel de agua es inferior al diámetro del tubo. Por este motivo, estos puntos se descartan.



Figura 6.5: Arroyo Pantanoso (izq.) y Arroyo del Molino (der.)

Otro punto importante, aunque menos determinante para la selección del curso, son las condiciones geográficas de su entorno. Es importante que el curso sea lo suficientemente accesible para permitir una correcta instalación del sistema y la posterior recolección de los residuos retenidos. Si bien este aspecto podría ser remediable con cierta inversión en obra civil, esta traería costos adicionales considerables. Zonas como la del Arroyo Saint Brendan's, el Arroyo Pantanoso y el Arroyo Chacarita quedan descartadas a causa de incumplir con este punto. Estos terrenos presentan orillas complejas, con varios desniveles que dificultan la accesibilidad, y zonas poco consolidadas y de alta humedad.



Figura 6.6: Arroyo St. Brendans

Por último, se tiene en cuenta la velocidad del agua en el cauce. Esto se debe a que el principio de funcionamiento de la barrera se basa en utilizar la propia corriente del curso como impulsora para redireccionar la basura hasta el punto de recolección. En varios de los cursos observados, como por ejemplo el caso del Arroyo Carrasco o el Arroyo del Molino, las zonas más propicias para la implementación del sistema desde el punto de vista geográfico, son de extremadamente bajo caudal en condiciones normales o incluso se detectan corrientes entrantes desde la costa (esto se observó en el Arroyo Carrasco, en zonas cercanas al mar). Ambas situaciones son contraproducentes para un buen funcionamiento de la barrera, debido a que el sistema requiere un flujo unidireccional.



Figura 6.7: Márgenes del Arroyo Carrasco (izq.) y Arroyo del Molino (der.)

Para medir las velocidades de los cursos de agua se utiliza un molinete o correntómetro de hélice. El funcionamiento se basa en que la velocidad de giro de la hélice será proporcional a la velocidad del curso

de agua. Para obtener la velocidad real del curso deberían tomarse múltiples medidas en distintas zonas del curso y a distintos niveles de profundidad para poder promediarlas. Únicamente se logra obtener datos para el arroyo Chacarita; las velocidades del resto de los cursos de agua no resulta suficiente como para lograr una medida con el instrumento utilizado.

Con el objetivo de analizar estas condiciones se replicaron en el canal de hormigón de la Facultad de Ingeniería, fijando el mismo nivel de agua que el obtenido en los arroyos y una velocidad tal que el correntómetro no marque una medida. En estos ensayos la barrera fue efectiva, por lo tanto se concluye que también lo será en las condiciones de los arroyos.

Se muestran a continuación imágenes de la toma de medidas de velocidad y el instrumento utilizado.



Figura 6.8: Procedimiento de medida con correntómetro.

La selección final se hace entre el arroyo Miguelete y Pantanoso, que son los que mejor cumplen con los parámetros que se clasifican como importantes.



Figura 6.9: Arroyo Miguelete (izq.) y Arroyo Pantanoso (der.)

Si bien ambos cumplen con los requisitos necesarios para aplicar la barrera de burbujas, se decide por el arroyo Miguelete. La decisión se basa en que sus alrededores son más sencillos para la instalación del equipamiento. A su vez, ambos cursos se encuentran muy cerca geográficamente, por lo que se infiere que deben presentar un nivel de contaminación similar en cuanto a sólidos flotantes por unidad de volumen. Por ende, al tener el Arroyo Miguelete un caudal mayor, se considera que este debería arrastrar una mayor cantidad de residuos, por lo que sería más provechoso la aplicación de la barrera en este y no en el Pantanoso.



Figura 6.10: Arroyo Miguelete, sitio seleccionado.

Capítulo 7

Sitio y Dimensionamiento

7.1. Sitio Seleccionado

A partir de la investigación realizada en el capítulo 6, se decide que el arroyo más propicio para la instalación de una BdB es el Arroyo Miguelete. Específicamente se plantea la colocación de la barrera en el cruce del puente de Av. Dr. Luis Alberto de Herrera, debido a su fácil acceso y márgenes despejados.

Se presentan imágenes del sitio seleccionado.



Figura 7.1: Arroyo Miguelete

7.1.1. Características geométricas

Dado que en la bibliografía disponible no se encuentran datos concretos de la geometría del arroyo en este punto, se procede a realizar una medición¹ (facilitada gracias a la presencia del puente). El ancho se mide directamente con una cinta métrica, obteniendo una medida de 19,3 m. La profundidad se mide utilizando un peso atado a una cuerda, el cual se usa para desde el puente tomar medidas en distintos puntos a lo ancho del arroyo, obteniendo de esta manera un tirante promedio de 0,39 m . La tabla 7.1

¹Cabe destacar que estas medidas se realizan en un período de sequía histórico, por lo que es de esperar que no se correspondan con las condiciones normales del arroyo.

presenta las medidas de profundidad en forma progresiva, la figura 7.2 ilustra estos datos mediante un esquema a escala 10V:1H y la figura 7.3 muestra las imágenes del procedimiento para la determinación del tirante a lo ancho del arroyo.

Progresiva (m)	Profundidad (m)
1,85	0,21
4,70	0,40
9,90	0,50
15,20	0,46
18,20	0,36

Cuadro 7.1: Tabla tirante Miguelete

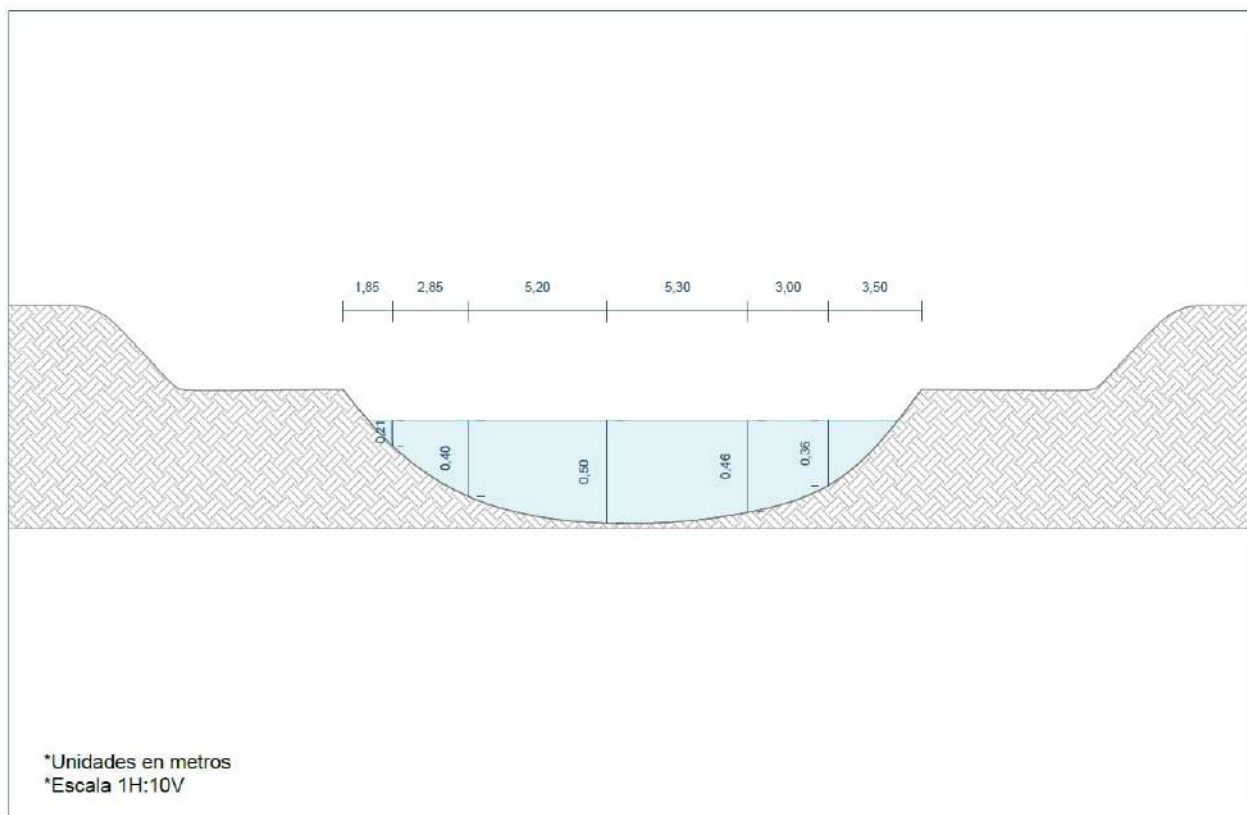


Figura 7.2: Sección transversal del arroyo en el sitio seleccionado, escala 1H:10V.

A su vez, tampoco es logra encontrar datos de caudal o velocidad del arroyo en bibliografía y, como se explica en la sección 6.2, la sensibilidad del correntómetro no permite obtener un resultado (se estima que en las condiciones actuales el curso de agua puede tener una velocidad de aproximadamente 0,05 m/s, medida por debajo de la apreciación del correntómetro). Se consulta con Federico Vilaseca, ingeniero civil y docente asistente grado 2 del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de Facultad de Ingeniería, respecto a valores usuales de velocidad en arroyos de similares características. Él menciona que en una condición normal para estos arroyos (no en un periodo de sequía como el que se presenta al momento de hacer este estudio, Febrero 2023) se tienen velocidades de hasta 0,2 o 0,3



Figura 7.3: Arroyo Miguelete

m/s, mientras que en crecidas podrían alcanzarse velocidades de hasta 1 m/s. A partir del ancho medido, el relevamiento de profundidad y una velocidad media supuesta² de 0,2 m/s se calcula el caudal medio obteniendo como resultado $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la figura 7.4 se presenta un esquema de la sección transversal del Arroyo Miguelete en la zona seleccionada para la aplicación de la barrera y en la figura 7.5 un esquema cenital de su ubicación.

²Se elige la velocidad máxima alcanzable para los ensayos en el canal de hormigón

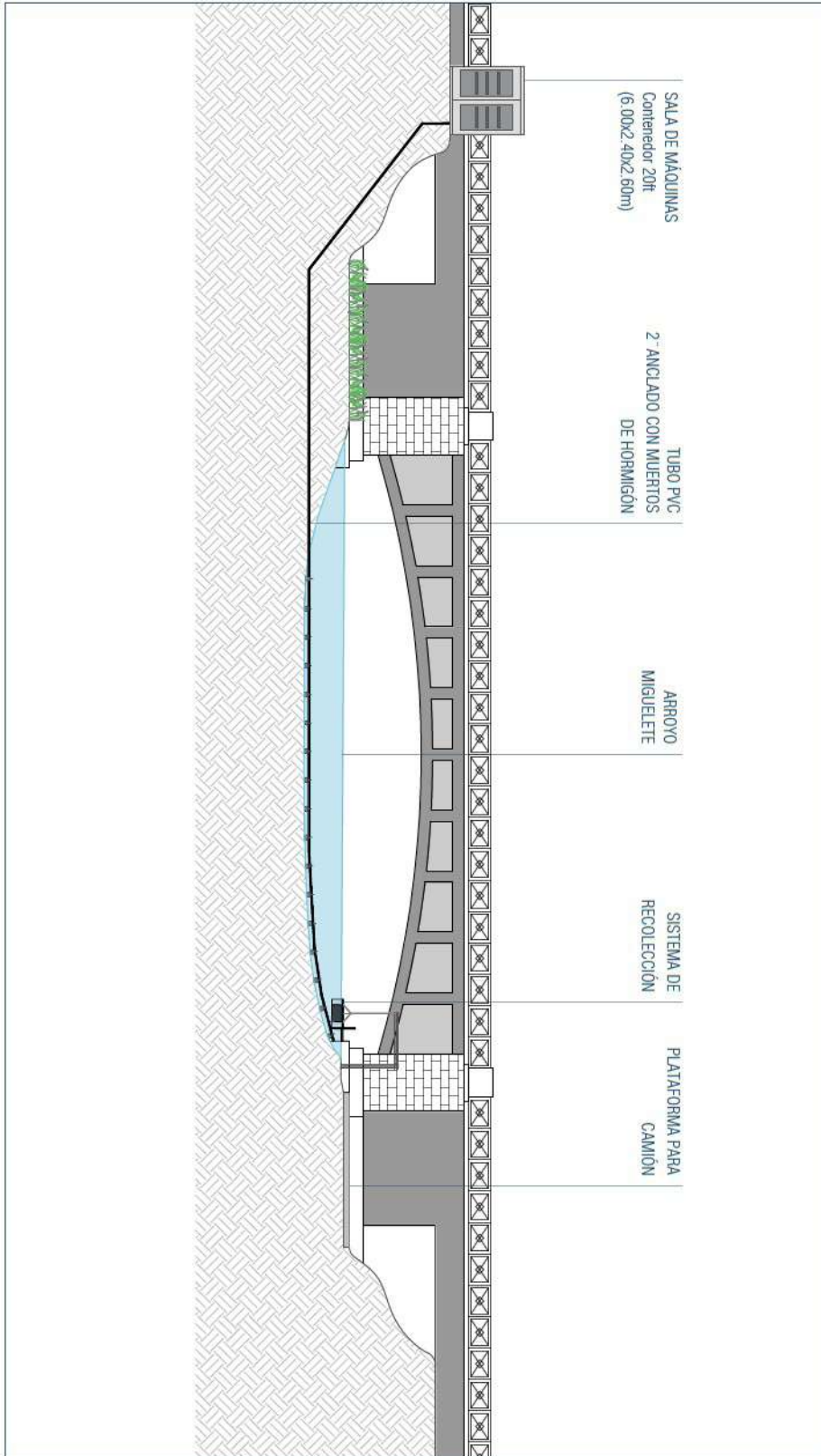


Figura 7.4: Sección transversal del Arroyo Miguelete en la zona seleccionada.

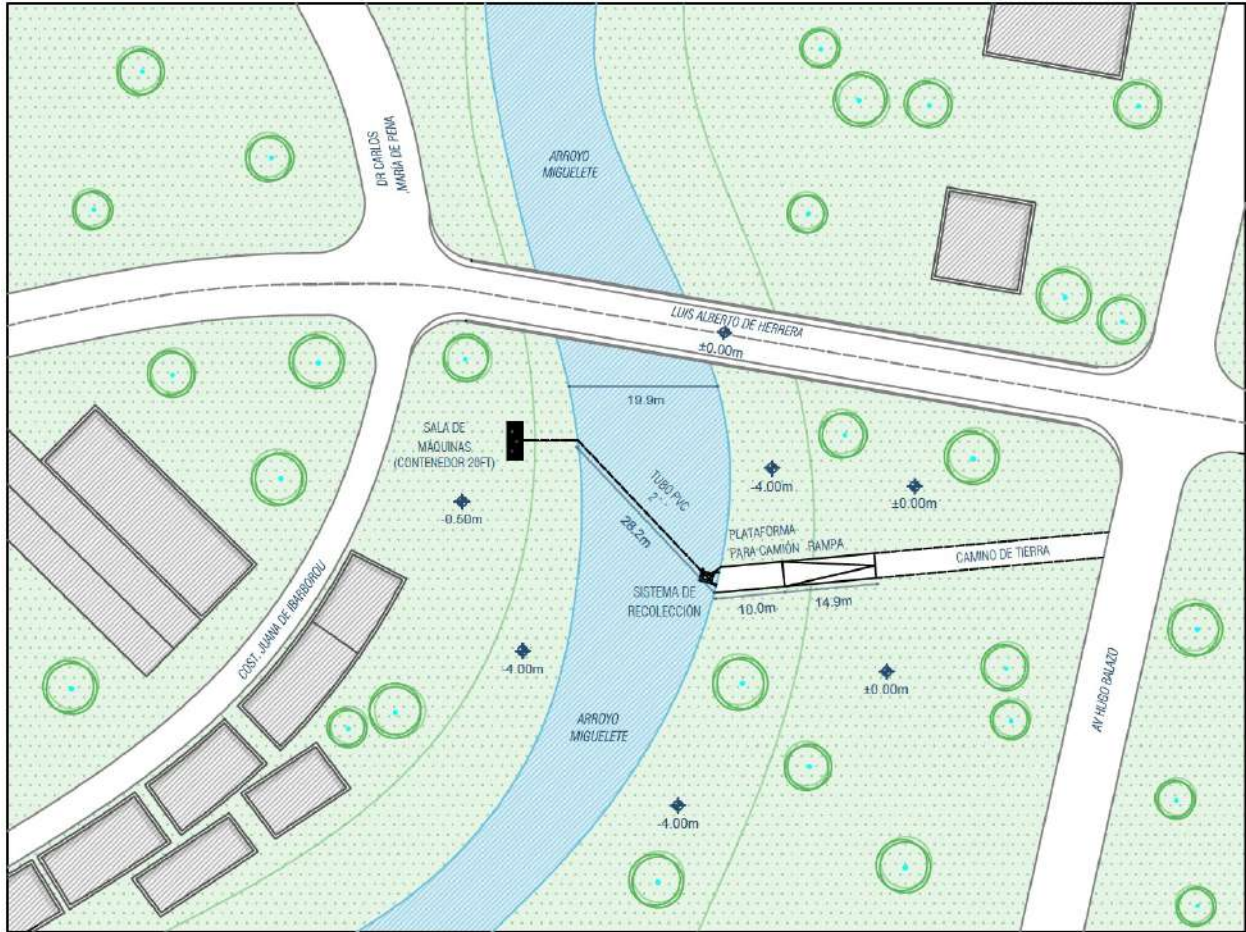


Figura 7.5: Esquema cenital del Arroyo Miguelete en la zona seleccionada.

Para el sitio seleccionado, es importante considerar la posible existencia de zonas muertas generadas por la presencia del puente [Jaurena et al., 2018a]. Estas zonas se originan por la contracción del cauce (como se observa en la figura 7.6), lo que tiene como resultado la posibilidad de que ciertos sólidos tengan tiempos de residencia prolongados en estas secciones. Por lo tanto, se debe llevar a cabo un estudio para identificar estas zonas y, posteriormente, seleccionar una ubicación óptima para el punto de recolección. Dicho punto debe estar situado fuera de las zonas muertas, para garantizar que exista corriente suficiente para el transporte de los residuos.

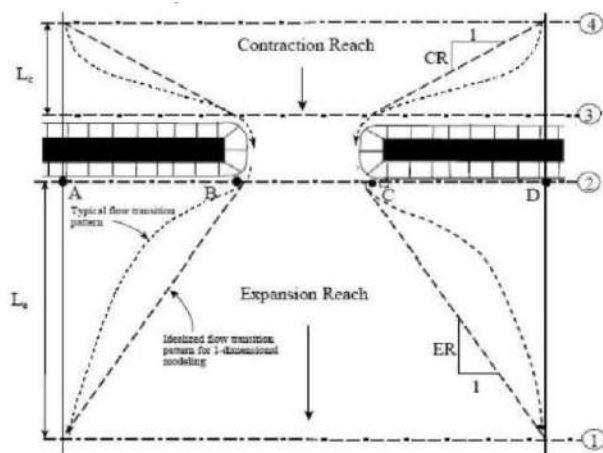


Figura 7.6: Zonas muertas en una contracción. Imagen obtenida de [Jaurena et al., 2018a]

7.1.2. Contexto urbano-ambiental

La Cuenca del Miguelete comprende una zona consolidada en cuanto a urbanización, [Jaurena et al., 2018c]. Aún hoy en día dicha urbanización continúa en crecimiento, por lo que la población a los márgenes del curso sigue en aumento. Esto incluye una cantidad considerable de viviendas irregulares en forma de asentamientos en regiones aguas arriba del sitio en cuestión, causando grandes dificultades para la recolección de los residuos por parte de las instituciones gubernamentales, habiendo muchas zonas inaccesibles para los camiones recolectores, por lo que esta tarea queda aproximadamente un 90 % en manos de una ONG. Además, y en parte como consecuencia, con el correr de los años se han formado basurales a cielo abierto no controlados, provocando que lluvias y vientos arrastren residuos hacia el arroyo. Como consecuencia, se tiene un cauce más contaminado que lo que suele observarse en otros, como se puede ver en la tabla 7.2, por lo que el sitio resulta provechoso para la implementación de la barrera.

	Área total (ha)	Área densamente poblada (ha)	Carga (ton/año)
Arroyo Carrasco	20009	4684	850
Arroyo Miguelete	11375	6028	1066
Río de la Plata Este	5166	5166	904
Arroyo Pantanoso	6723	4125	727
Río de la Plata Oeste	4872	762	142
		Total (ton/año)	3689

Cuadro 7.2: Cuantificación de residuos en el drenaje urbano por escurrimiento superficial. Fuente: [Pereira, 2018]

7.2. Dimensionamiento de prototipo

Dados los buenos resultados obtenidos en los ensayos, se opta por seguir un criterio experimental que se basa en replicar el mismo sistema de laboratorio, pero a mayor escala³. De este modo, se decide mantener las características del tubo (material, diámetro, diámetro de orificios y espaciamiento de orificios), únicamente aumentado el largo de 2,1 m a 28,2 m. Gracias a que las condiciones de tirante y caudal ensayadas son similares a las del cauce de agua objetivo, se estima que las presiones para las cuales la barrera obtiene buenos resultados en los ensayos, también sea exitosa para el prototipo.

En resumen, las características del tubo son:

- Largo: 28.2 m
- Diámetro: 2"
- Material: PVC
- Diámetro de orificios: 1 mm
- Espaciamiento entre orificios: 3 cm
- Ángulo de inclinación de la barrera: 45°

El desafío al pasar del ensayo de laboratorio a las condiciones del prototipo consiste en determinar el caudal de aire necesario para asegurar una salida de aire por todos los orificios y lograr una presión en la entrada del tubo que garantice el correcto funcionamiento de la barrera con esta nueva longitud. Cabe destacar que una mayor longitud trae consigo un mayor número de agujeros, por lo que se sabe de antemano que el caudal será mayor al ensayado en el laboratorio. Con el fin de determinar este caudal se desarrolla un programa de cálculo en Octave que se explica a continuación.

7.2.1. Cálculo de caudal de ingreso - Programa en Octave

‘Para lograr porcentajes de efectividad de retención de la barrera en el entrono de los resultados obtenidos en los ensayos, se debe conseguir que las presiones a lo largo del tubo sean similares a las ensayadas. Debido a las pérdidas de carga, se sabe que el punto más comprometido en términos de mínima presión necesaria será el del último orificio, por lo que para garantizar una presión mínima necesaria que asegure la salida de aire por todos los orificios a lo largo de todo el tubo, basta con lograr que la presión en el último orificio sea mayor o igual a la mínima necesaria. El código desarrollado en Octave realiza los cálculos de pérdida de carga tramo a tramo, contemplando las pérdidas de caudal por cada orificio. Sumando las salidas del programa, tanto las perdidas de carga tramo a tramo como los caudales por cada orificio, es posible obtener la pérdida de carga total y el caudal total de salida. Se adjunta en el anexo E el código de cálculo de este programa.

³Existe una teoría de cálculo desarrollada en [Mascha and Christensen, 1983] donde se presenta un método para la obtención de los valores “óptimos” para el sistema.

Consideraciones para la corrida del programa

El programa desarrollado permite variar parámetros del sistema tales como: material y diámetro del tubo, espaciamiento y diámetro de los orificios y presión de entrada al tubo, los cuales impactan directamente en el cálculo de la pérdida de carga. Sin embargo, como se decide que el prototipo tendrá las mismas características que el modelo a excepción de su largo, se deja el resto de los parámetros fijos. La presión a la entrada del tubo permanece como parámetro libre para, en función de esta, hallar el caudal de aire necesario en las distintas condiciones de trabajo que se le impongan a la barrera.

A la hora de la selección de la presión de entrada para obtener el caudal total y con estos parámetros poder realizar el dimensionamiento del compresor se tienen dos limitantes: la primera es que la máxima velocidad que se logra alcanzar en el canal de hormigón para simular el curso de agua ronda los 0,2 m/s, y la segunda es que la presión máxima que se logra con el compresor con el que se ensaya dada la longitud del tubo del prototipo ensayado y la cantidad de orificios que este tiene es de 195 mbar.

Por lo que se menciona en el párrafo anterior, no es posible ensayar el sistema para una condición de crecida que podría llegar a observarse en el arroyo Miguelete, por lo que, para el dimensionamiento del compresor, se utilizan las condiciones más exigentes que pudieron ser ensayadas.

En línea con lo mencionado previamente, se corre el programa con una presión de 150 mbar, condiciones para las que se obtienen como 100 % de retención en los ensayos.

Como se describe en la sección 5.5.3, el coeficiente de descarga por un orificio depende del caudal que circula por el mismo. Sin embargo, como se observa en los resultados del ensayo en el canal de hormigón, estos coeficientes se mantienen prácticamente constantes para el rango de caudales ensayados. Por esto y a fin de simplificar los cálculos, se decide fijar el coeficiente de descarga como un valor constante de $C_d = 0,25$.

Con este supuesto y fijando la presión de entrada en 150 mbar se inicia una iteración que finaliza cuando la diferencia entre el caudal de entrada y la suma de los caudales salientes por los orificios es menor a cierta tolerancia.

Las principales ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$Q_{orificio,i} = c_d Y A_{orificio} \sqrt{\frac{2(P_i - P_{agua})}{\rho_i(1 - \beta^4)}} \quad (7.2.1)$$

$$Q_{entrada,amb} = \sum_{i=1}^N Q_{orificio,i} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_{amb}} \quad (7.2.2)$$

$$P_i = P_{i-1} - f_i \frac{L}{D} \frac{v_i^2}{2} \rho_{i-1} \quad (7.2.3)$$

En la figura 7.7 se presenta el ciclo de iteración programado.

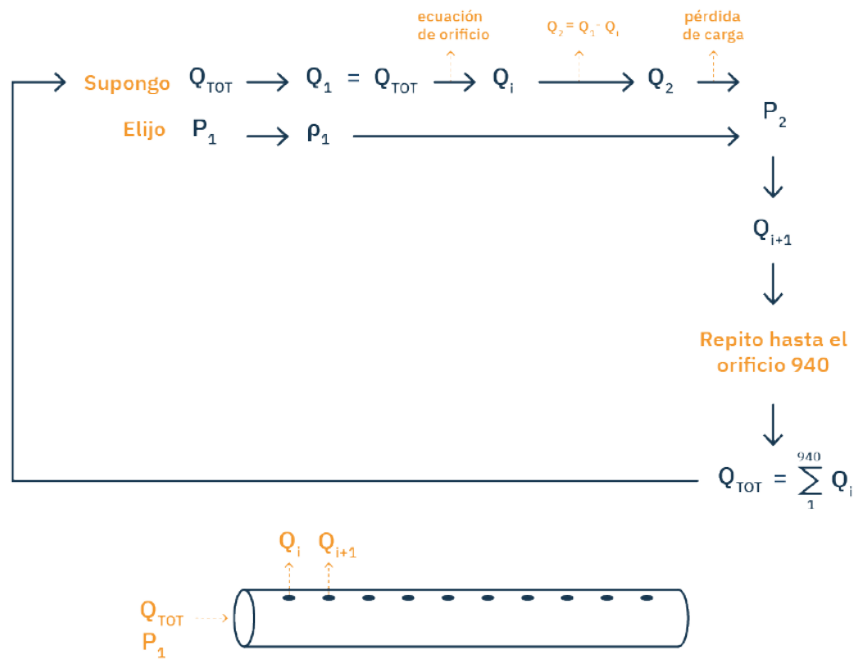


Figura 7.7: Diagrama de iteración del código en Octave.

Con el resultado obtenido se evalúa la curva de presión a lo largo del tubo y se obtiene como resultado que la presión mínima del tubo es 146,6 mbar, lo que representa una caída del 2,27 % hasta el final del tubo. En base a esto se concluye que el largo de tubo que se proyecta no presenta una pérdida de carga significativa, por lo que se descarta la necesidad de una segunda entrada de aire para asegurar la presión mínima requerida en cada orificio del tubo.

Para resolver este balance de masa, se destaca que es necesario realizar los cálculos en condiciones normales (0°C y 1 atm). Esto se debe a las diferencia de densidad a lo largo del tubo; de esta forma es posible comparar el caudal de entrada en esta unidad (Nm^3/s) con la suma de los caudales por orificio. Como salida del programa también se obtiene la medida de caudal en condiciones normales para la selección del compresor.

Se obtiene que el caudal necesario es de $Q = 0,0255m^3/s$ y que la presión mínima en el tubo (que se da en el último orificio) es de $P(i = 940) = 1,466 \times 10^4 Pa = 146,6 mbar$, como se menciona en el párrafo anterior.

En la figura 7.8 se presentan los resultados obtenidos con el programa descrito.

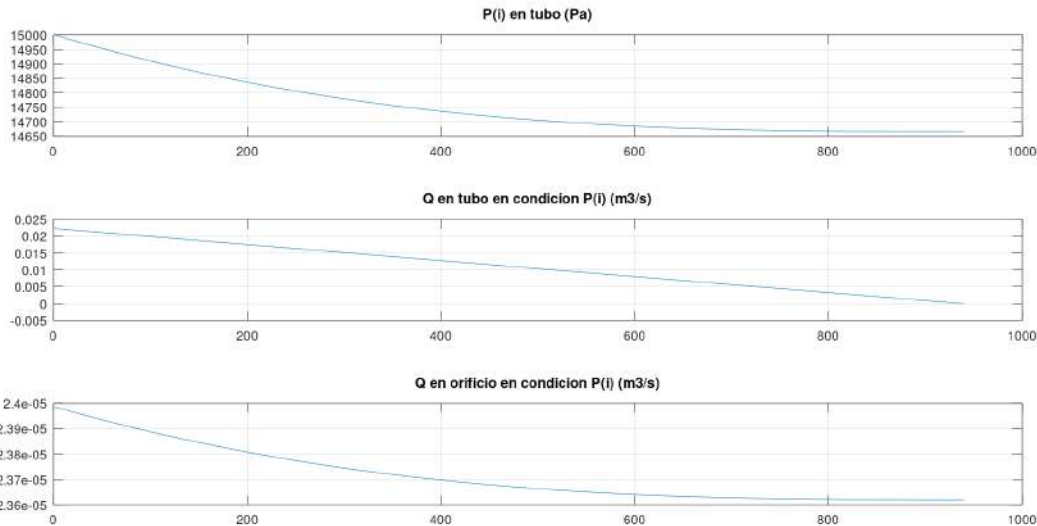


Figura 7.8: Resultados obtenidos del programa.

A modo de realizar una verificación del programa utilizado, se corre una prueba con las condiciones ensayadas en el canal de hormigón. Los valores obtenidos de caudal son muy similares a los medidos en el laboratorio, por lo que se considera que el programa funciona correctamente.

7.2.2. Compresor

Una vez determinadas la presión y el caudal necesarios para el correcto funcionamiento de la barrera, se procede con la selección del compresor.

Para hacer esta selección se tiene en cuenta la inversión inicial, el consumo energético y las distintas características de los equipos (versatilidad de operación y regulación, confiabilidad, mantenimiento, etc.) para determinar el equipo óptimo para estas condiciones de trabajo. La comparación se realiza entre cuatro equipos distintos, dos soplantes de lóbulos y dos compresores de tornillo.

La evaluación realizada, que se detalla en el anexo G, resulta en la selección de un Atlas Copco ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6 Y. Se trata de un soplante trilobular exento de aceite con las siguientes características:

- Caudal entregable (min - max) [l/s]: 14 - 39
- Potencia consumida por el compresor [kW]: 0,6 - 1,6
- Potencia consumida por el equipo completo [kW]: 0,9 - 1,9
- Temp salida Aire [°C]: 41 - 44

Este equipo cuenta con un controlador VSD integrado con panel Elektronikon® Mk5, con el que se puede regular los parámetros de funcionamiento del dispositivo de desplazamiento positivo y la supervisión

total del estado del soplante. Para esto, posee un manómetro diferencial y otro mecánico, los cuales proporcionan información fácil de leer en el panel delantero del equipo, sobre la presión de salida y el estado del filtro de aire. De este modo se puede regular la velocidad de giro, entregando mayor caudal de aire en situaciones de crecida del arroyo, y se puede realizar un mantenimiento preventivo programado reduciendo al mínimo el tiempo sin alimentación de aire a la barrera y reduciendo los costos de operación.

En cuanto a la seguridad, el equipo cuenta con una válvula de seguridad POV que garantiza que la presión siempre esté bajo control y que no haya problemas en el arranque. Esto resulta indispensable para la aplicación debido a la posibilidad de que se generen obstrucciones en la salida de aire y consecuentemente grandes aumentos de presión. Además, cuenta con tensado automático de la correa mediante el peso del motor, lo que elimina el resbalamiento gradual de la correa y mantiene un elevado nivel de rendimiento de la transmisión durante toda la vida útil de la correa.

El hecho de funcionar sin necesidad de aceite resulta otra característica ventajosa para la aplicación. De este modo, el aire comprimido, que se inyecta directamente en el curso de agua, no arrastra aceite que pueda introducir otro tipo de contaminante en el ambiente.

Este equipo es ensayado según la norma ISO 1217:2009. Su costo es de U\$S15,000 y cuenta con todo lo necesario para su puesta en marcha. En la figura 7.9 se presenta una imagen del equipo seleccionado.



Figura 7.9: Soplante Atlas Copco, modelo ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6 Y. Fuente: Catálogo proporcionado por el proveedor.

Operación del Compresor

El principio de funcionamiento de los compresores de lóbulos se basa en lo que se conoce como “compresión externa”, esto significa que el aumento de presión se logra a partir del desplazamiento del fluido

desde una zona de baja presión a una zona de alta presión, sin compresión interna. Por lo tanto, la presión de trabajo de estos equipos no es regulable, sino que queda determinada directamente por la pérdida de carga a vencer. Dada la geometría interna del soplante seleccionado, este entrega aire a una presión mínima de 300 mbar, lo que conlleva a tres alternativas en el diseño del sistema de control y operación de la barrera:

- Sistema de control mediante válvula
- Sistema de control mediante tanque de acumulación
- Sistema libre

Si bien surgen estas tres alternativas para el diseño del sistema, se opta por desarrollar la alternativa de control mediante válvula, dado que es la configuración de la que se posee mayor información por su similitud con el sistema utilizado en los ensayos. En el anexo K se presenta una descripción de las otras dos alternativas.

Por un lado, debido a los resultados exitosos obtenidos en los ensayos y a su similitud con las condiciones normales del arroyo, se plantea intentar replicar las condiciones de presión de los mismos y por ende utilizar los caudales que pueden ser calculados a partir del programa presentado en la sección 7.2.1. Entonces, en condiciones normales se busca entregar a la barrera un caudal de $0,0255 \text{ m}^3/\text{s}$ a una presión de 150 mbar. Gracias al sistema de regulación de velocidad de giro que contiene el equipo, obtener el caudal calculado no resulta una dificultad. Para lograr la presión de 150 mbar se plantea colocar una válvula globo actuada eléctricamente en la línea de aire que provoque la pérdida de carga necesaria, tal como se realiza en los ensayos.

Además, debido a que a la salida del compresor el aire se encuentra a una presión mínima de 300 mbar, esta podría regularse con la válvula globo a una presión de entrada al tubo mayor a las estudiadas en los ensayos, acompañado con un mayor caudal mediante el aumento de la velocidad de giro del compresor, en caso de que las condiciones en el arroyo fueran más exigentes. Según las observaciones realizadas, el aumento de presión se acompaña de una mejor retención de residuos, fenómeno que pudo comprobarse siempre dentro del rango de presiones estudiado. Sin embargo, debido a las limitantes impuestas por el equipo utilizado en los ensayos, no se logra evaluar el sistema a presiones mayores a los 195 mbar, por lo que no se puede asegurar que para presiones mayores se mantenga la misma tendencia.

Consumo eléctrico

En condiciones normales de operación el equipo seleccionado consume 1,3 kW de potencia y trabaja todos los días durante las 24 horas lo que, como se observa en la tabla G.2, del anexo G, corresponde a 936 kWh mensuales. Considerando la Tarifa General Simple del Pliego Tarifario Vigente desde el 01/01/2023 [UTE, a], este consumo cae en el rango de 1 a 1.000 kWh mensuales, el cual tiene un costo de 5,579 \$/kWh. De este modo, el cálculo de costo energético anual resulta en \$62.663.

7.2.3. Instrumentación y sistema de control

En esta sección se propone y diseña un sistema de control para lograr que la retención de residuos sea la más alta posible invirtiendo la menor energía posible en todo momento, incluso para situaciones de adversidad climática. Esta necesidad puede ser evaluada mediante un estudio simulando las condiciones más extremas del curso de agua.

De acuerdo a las observaciones realizadas en laboratorio, a velocidades de agua bajas (menores a 0,1 m/s), una presión de aire de 100 mbar resulta suficiente para obtener porcentajes de retención elevados (mayores al 85 % y casi siempre cercanos al 100 %). Si se tienen velocidades de agua intermedias (entre 0,1 y 0,3 m/s), lo que se supone la situación normal del arroyo, conviene aumentar la presión a 150 mbar para mejorar la retención. Finalmente, si la velocidad del arroyo aumenta aún más, como puede suceder en una crecida provocada por una tormenta, no se sabe con exactitud si los 150 mbar serían suficiente (ya que no se pudo ensayar en estas condiciones). Se presupone que para dichas situaciones, convendría aumentar aún más la presión del aire, ya que la tendencia estudiada indica que una mayor presión ayuda a contrarrestar el decrecimiento en retención que se observa al aumentar la velocidad del agua.

A partir de este análisis se propone un sistema de control que sea capaz de regular la presión de la barrera en función de la velocidad del flujo. Si únicamente se consideran los ensayos evaluados, se define que la presión de la barrera debe variar entre 100 y 200 mbar⁴. Para esto, hace falta instalar una válvula de control de presión tipo globo actuada eléctricamente en la tubería que une al compresor con la barrera de burbujas y un caudalímetro de canal abierto en el arroyo que sense la velocidad del agua y envíe una señal analógica de 4-20 mA para regular el porcentaje de apertura de la válvula. Dicha comunicación se realiza mediante un controlador de procesos modular NOVUS N20K48, el cual recibe una señal analógica del caudalímetro y envía otra señal analógica a la válvula. Con los pares de velocidad de agua y presión mencionados en el párrafo anterior se define la curva de caracterización para la apertura o cierre de la válvula. Para lograrlo se elige una válvula marca SMC serie ITV3010, con una capacidad de 4000 l/min (66,7 l/s) y un rango de ajuste de presión de 0,005 a 0,1 MPa (50 a 1000 mbar) y un caudalímetro de efecto Doppler SonTek-IQ series plus [SonTek, 2019], apto para aplicaciones en canales abiertos, con un rango de velocidades de ± 5 m/s y una resolución de 0,0001 m/s.

La variación de presión debe acompañarse con un ajuste en el caudal, lo que se logra mediante la variación de la velocidad de giro del compresor. Con ayuda del programa presentado en la sección 7.2.1 se calculan los caudales necesarios, correspondientes a las presiones de 100, 150 y 200 mbar:

- @ $P = 100\text{mbar} \Rightarrow Q = 0,0177\text{m}^3/\text{s}$
- @ $P = 150\text{mbar} \Rightarrow Q = 0,0255\text{m}^3/\text{s}$
- @ $P = 200\text{mbar} \Rightarrow Q = 0,0319\text{m}^3/\text{s}$

Para el caudal entregado por un soplante de lóbulos se tiene la siguiente expresión:

$$Q = V_D N - \beta(P_2 - P_1) \quad (7.2.4)$$

⁴Hacen falta más ensayos, con equipos similares al seleccionado, para afinar el rango de presiones necesario.

Donde V_D es el volumen desplazado (parámetro geométrico y por ende constante); N la velocidad de giro; β un parámetro que relaciona la luz entre los lóbulos y la carcasa con el largo y ancho de los dientes y con la viscosidad del fluido; y P_2 y P_1 las presiones aguas abajo y aguas arriba del compresor respectivamente.

El segundo término de la expresión 7.2.4 es despreciable, por lo tanto se tiene:

$$\frac{Q}{N} = V_D \Rightarrow \frac{Q}{N} = cte \quad (7.2.5)$$

El fabricante declara que girando a 2554 rpm, el compresor entrega $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$. Entonces, con la relación 7.2.5 se obtienen las velocidades de giro necesarias para los distintos caudales calculados:

- $Q = 0,0177 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow N = 1808 \text{ rpm}$
- $Q = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow N = 2605 \text{ rpm}$
- $Q = 0,0319 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow N = 3259 \text{ rpm}$

Para lograr este control se coloca un transmisor de presión Danfoss MBS 4010, con rango de 0-400 mbar, aguas abajo de la válvula. Este se comunica mediante una señal analógica de 4-20 mA con el controlador Elektronikon MK5 integrado al compresor, del cual sale otra señal analógica para regular su velocidad de giro según las relaciones mencionadas.

En la figura 7.10 se presenta una diagrama P&ID del proceso descrito, donde V representa el sensor de velocidad de agua.

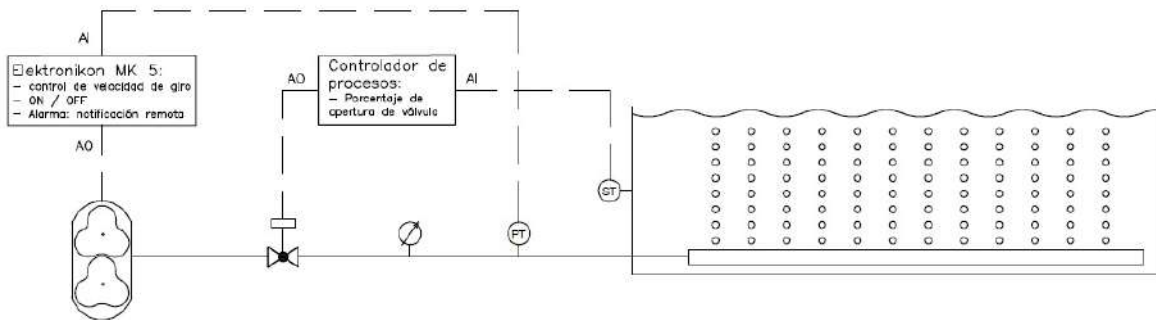


Figura 7.10: Diagrama P&ID del sistema BdB con el método de regulación propuesto.

Cabe destacar que la reducción de la presión, y por ende de la velocidad de giro, se justifica desde el ahorro energético que esta supone. El compresor girando a 1808 rpm supone un ahorro del 23 % con respecto a la situación de operación normal, donde gira a 2605 rpm.

A su vez podría resultar importante tener mediciones del viento dado que este podría impactar sobre la efectividad de la barrera. Este parámetro, que no pudo ser cuantificado debido a que los ensayos se realizaran en un espacio cerrado, se estima que podría ser relevante.

Dado a que se establece que los períodos de recolección del sistema de jaula deberá realizarse cada un período fijo, que se establecerá con el equipo una vez instalado y funcionando en campo, surge, a modo de detectar posibles saturaciones del sistema de recolección, la inclusión de una cámara de vídeo conectada de manera remota, capaz de transmitir imágenes en tiempo real 24hs. La implementación de esta cámara permitiría, mediante el control de imagen por parte de una persona, evitar el colapso en el sistema de recolección por acumulación, asegurando su correcto funcionamiento.

Finalmente se plantean sistemas de alarma ante posibles fallos. Para esto, el transmisor de presión debe enviar una señal analógica al controlador Elektronikon MK5, en el cual se configuran las presiones mínimas y máximas admisibles. Si se exceden estas presiones, el controlador envía una salida digital para apagar el compresor. A su vez este panel posee un sistema de telemetría que permite enviar una notificación a un teléfono celular o una computadora cuando el compresor se haya apagado. De esta manera, la persona encargada del control y supervisión puede ser informada inmediatamente, lo que permite tomar las medidas necesarias. Se consideran dentro de los posibles fallos: una rotura en el tubo, provocando de esa manera una gran pérdida de presión; un gran aumento de presión, provocado por algún tipo de obstrucción en el sistema; o un corte de luz.

Teniendo en cuenta que el caudalímetro SonTek-IQ series plus ofrece la posibilidad de medir el nivel de agua mediante diferencia de presiones, se evalúa la posibilidad de agregar una señal para el apagado del equipo en casos de muy bajo nivel donde, como se comentó en 5.5, la efectividad de la barrera se ve considerablemente reducida (llegando a ser nula en situaciones extremas). Este valor de nivel mínimo queda pendiente a ser evaluado en ensayos en campo y la comunicación se realizaría mediante el controlador integrado del soplante.

7.2.4. Sistema de recolección

Una vez dimensionados los componentes de la barrera de burbujas, resta diseñar y dimensionar el sistema de extracción de plásticos.

El objetivo de este componente es lograr la retención de los residuos para luego extraerlos del curso de agua. Se evalúa este sistema desde su viabilidad operativa a la hora de la recolección y se tiene en cuenta la inversión económica para lograr la implementación. Además, es importante que la región de la barrera hacia donde se dirigen los contaminantes no se vea desbordada, ya que en ese caso la acumulación podría generar un efecto contraproducente. Esta acumulación llevaría a un comportamiento distinto al de cada objeto por separado, si bien un objeto logra ser retenido por la barrera de forma individual, cuando estos se encuentran atascados en una zona comienzan a interactuar entre ellos intercambiando cantidad de movimiento a través de choques y puede tener como consecuencia que algunos de estos terminen superando la barrera.

Con el objetivo de lograr el diseño de este sistema se evalúan dos opciones, la primera de ellas una cinta transportadora que funcione de manera continua y como segunda opción una jaula en la que los residuos vayan acumulándose y se realice su extracción cada cierta cantidad de tiempo, que puede variar en función de la tasa de acumulación de los residuos.

Debido a los criterios mencionados anteriormente se define que el mejor método para este sitio seleccionado será el sistema de jaula. A continuación se describe el método seleccionado y se adjunta en el anexo C la información considerada para el sistema de cinta transportadora.

Método de recolección: Sistema de jaula y brazo mecánico

Este método consiste en una jaula formada por mallas de acero inoxidable, la cual se acopla a un recinto estructural. La misma será retirada para su desagote por medio de un brazo mecánico accionado por un motor eléctrico.

La malla seleccionada para la jaula está formada por alambres de 0,51 mm de espesor y 1,6 mm de luz. Esto permite el escurrimiento del agua mientras que logra retener tanto plásticos como microplásticos. La cara frontal de la jaula posee una compuerta del mismo material y dos rieles en sus laterales que permiten la apertura y cierre de esta. Esta compuerta permanece abierta mientras el sistema está en funcionamiento y se debe cerrar para su extracción con el fin de evitar la fuga de los residuos retenidos durante el izaje. El peso aproximado de la jaula es de 4 kg.

Para lograr que la jaula permanezca en el lugar adecuado se diseña un recinto estructural al cual se fijará la jaula mediante cerrojos. Estos cerrojos deberán ser abiertos por un operador en el momento de la extracción.

La estructura donde se coloca la jaula está conformada principalmente por metal desplegado de acero inoxidable. En este caso la malla tiene una luz de aproximadamente 2 cm, dado que el fin de este elemento no es la retención de residuos. Además, este formato de malla es de carácter estructural, brindando soporte al sistema y permitiendo que el operario que realiza la extracción pueda caminar sobre esta estructura. La cara frontal del recinto es abierta, con dos placas de acero inoxidable en los laterales colocadas a 45° (siguiendo aproximadamente la línea de la barrera de burbujas) para terminar de guiar los residuos hacia el interior. La estructura se acopla a dos perfiles verticales de acero inoxidable que además de servir de anclaje para el sistema, sirven también como guía, permitiendo que la estructura pueda desplazarse en la dirección vertical, acompañando a las subidas y bajadas de nivel que ocurren en el arroyo para los distintos períodos del año. Para lograr esto se incluyen flotadores en sus laterales.

Dado que la ribera del Arroyo Miguelete presenta taludes laterales, con un ángulo de aproximadamente 45°, se incluye una plancha de acero inoxidable con geometría triangular de manera que se evite que los plásticos escurran por los laterales. Esta plancha considera el mismo ángulo de incidencia que las ubicadas en el recinto.

En las figuras 7.11 y 7.12 se presentan los croquis del sistema descrito.

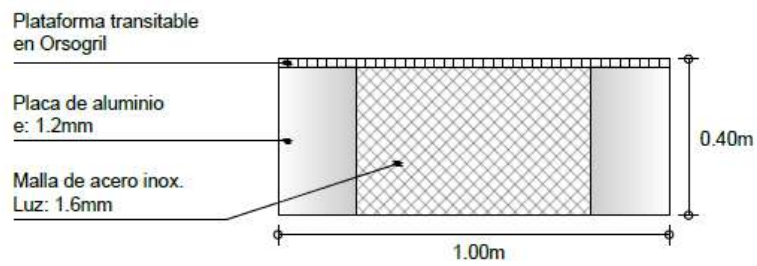
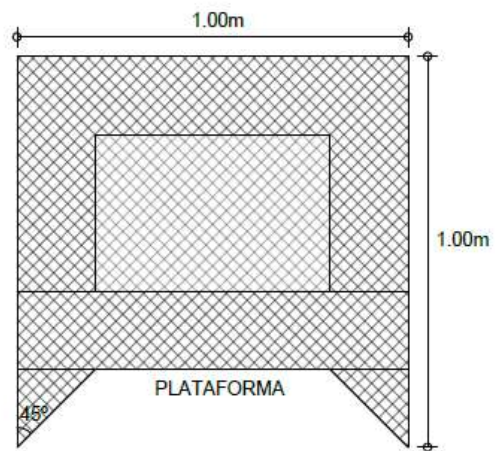


Figura 7.11: Corte (abajo) y planta (arriba) del sistema de recolección.

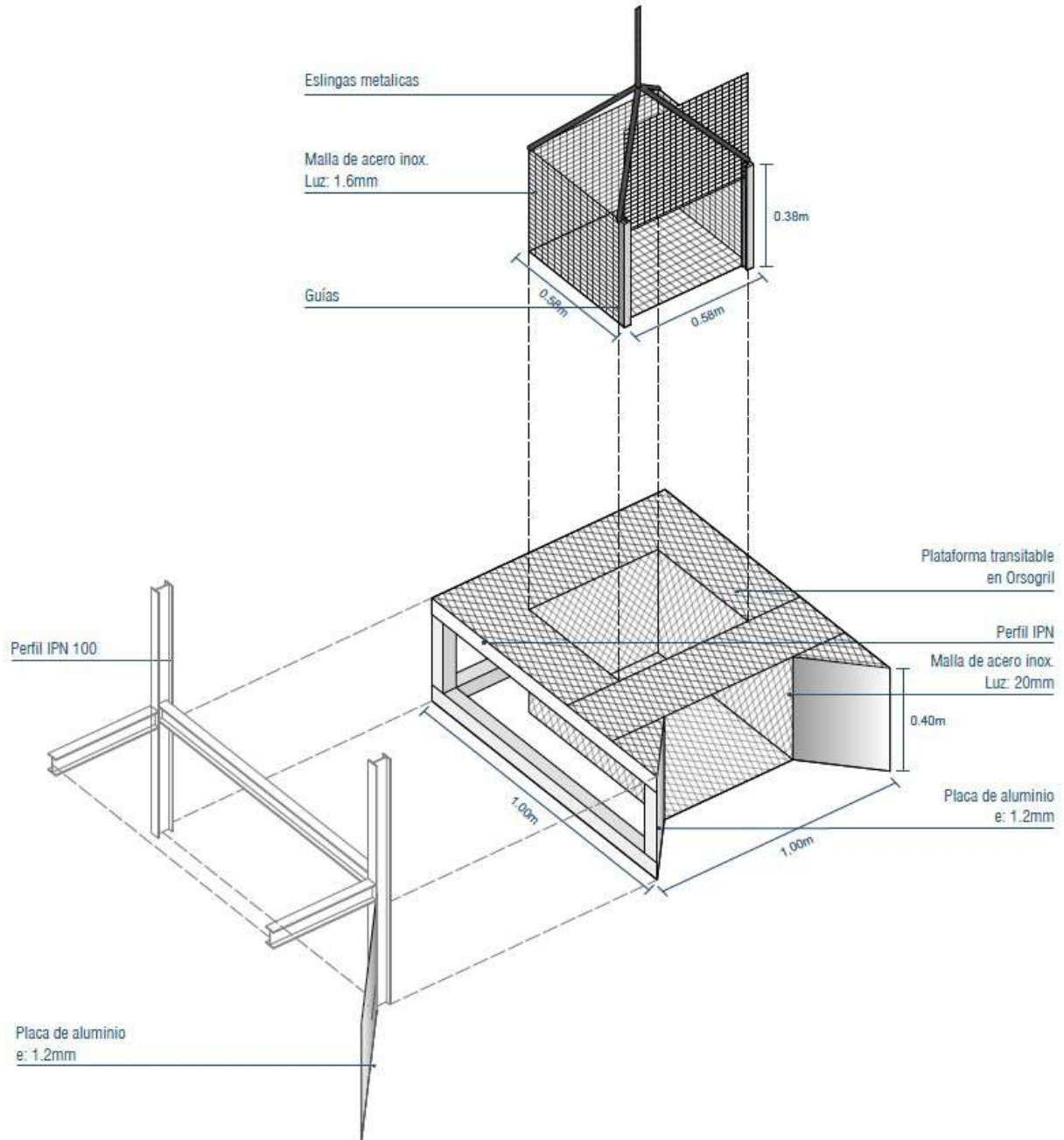


Figura 7.12: Esquema tridimensional del sistema de recolección.

Cuando la jaula esté llena, se deberá retirar y vaciar. Para esto se propone un brazo giratorio fijado a la orilla del arroyo cuyo diseño se explica más adelante. Mediante un motor eléctrico y polea, este es capaz de elevar la jaula a una velocidad controlada, rotar 90° sobre su propio eje y depositar la jaula sobre la margen del arroyo, para que un operario pueda vaciarla y así retirar los residuos acumulados.

La selección del motor se basa principalmente en dos parámetros, la velocidad de ascenso y el peso a elevar, los cuales determinan la potencia necesaria.

- Velocidad: Se considera una velocidad de ascenso de 0,2 m/s, con el objetivo de realizar una extracción controlada y permitir el mayor escurrimiento de agua posible.
- Peso: El peso aproximado de la jaula es de 4 kg. Se estima que al llenar la jaula, los residuos mojados recolectados tienen una masa de aproximadamente 150 kg.

Con estos supuestos, y considerando un factor de seguridad $FS = 2$, se calcula la fuerza a realizar y la potencia necesaria:

$$F = FS \cdot (m_{jaula} + m_{basura}) \cdot g \quad (7.2.6)$$

$$P = F \cdot v$$

Se obtiene que el motor necesario debe realizar una fuerza de al menos 3018 N (308 kgf), resultando en una potencia de al menos 604 W (0,8 HP). Con estos resultados, se elige un motor NEO AP9400 con, una capacidad máxima de 400 kg y con un costo aproximado de 250 USD.

En el anexo C se listan las ventajas y desventajas del sistema de jaula y brazo mecánico en comparación con el método de cinta transportadora.

Cálculo de esfuerzos y puntos más comprometidos

Análisis estructural del sistema de recolección

Para el cálculo del punto más comprometido se supondrá que el sistema de jaula se comporta como una placa plana de longitud $L_2 = 1$ m y una altura de $z = 0,4$ m (esta suposición sirve como un factor de seguridad, dado que aumenta la superficie sobre la que se aplica la fuerza de la corriente de agua), perpendicular a la corriente de agua con una velocidad $v_{agua} = 2$ m/s.

La fuerza aplicada por el agua sobre la placa se halla a partir de la presión dinámica del fluido en la superficie sumergida de la placa. La presión dinámica p se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli y se llega a la siguiente expresión.

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot v_{agua}^2 \quad (7.2.7)$$

En este caso, la densidad del fluido es $\rho = 1000$ kg/m³ y la velocidad asumida para la corriente de agua es $v_{agua} = 2$ m/s. La presión dinámica es entonces:

$$p = 2000 \text{ Pa} \quad (7.2.8)$$

La fuerza F_{agua} sobre la placa se puede calcular como el producto de la presión dinámica y el área de la superficie sumergida de la placa $A = L_2 \cdot z$.

$$F_{agua} = p \cdot A = 800 \text{ N} \quad (7.2.9)$$

Por lo tanto, la fuerza sobre la placa sumergida en un fluido con velocidad uniforme es de 800 N (newtons).

A continuación se presenta el diagrama de cuerpo libre para el sistema de jaula.

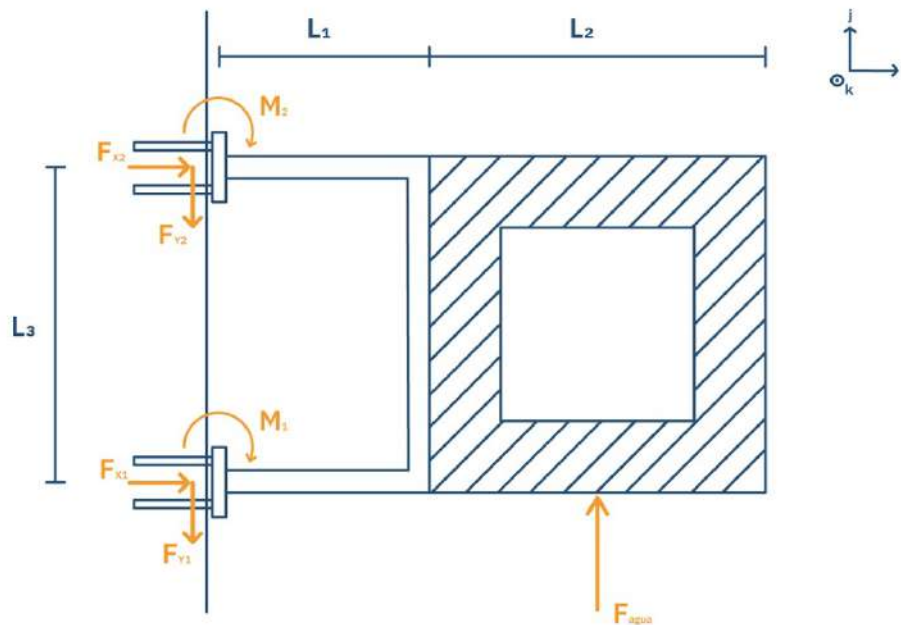


Figura 7.13: Diagrama de fuerzas de la jaula, vista cenital.

Se plantean las ecuaciones cardinales para el sistema de Jaula.

Primera cardinal según \hat{j} ⁵:

$$F_{agua} = F_{y1} + F_{y2} \quad (7.2.10)$$

Debido a que se trata de un sistema hiperestático se asumirá que la fuerza en el eje y se distribuye de igual manera en ambos apoyos, por lo tanto $F_{y1} = F_{y2} = 400 \text{ N}$.

Primera cardinal según \hat{i} :

$$0 \text{ N} = F_{x1} + F_{x2} \quad (7.2.11)$$

No se consideran las fuerzas en la dirección \hat{k} debido a que a las guías se encuentran empotradas al suelo y el sistema de jaula posee flotadores por lo que tiene como consecuencia que los esfuerzos en la dirección k sean despreciables.

Para evaluar los amarres se plantea la segunda cardinal respecto al primer amarre (amarre superior

⁵Se separan las fuerzas según amarre.

en el diagrama 7.13, cuyas varillas se someten a compresión). Cabe destacar que, para los cálculos, los amarres no se consideran como empotramientos, por lo tanto, los momentos puntuales en los mismos serán descartados. Esta medida sobredimensiona las fuerzas involucradas y, en consecuencia, garantiza un sistema más seguro.

$$0 = 800 \text{ N} \cdot \left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right) - F_{y_1} \cdot L_3 \quad (7.2.12)$$

Considerando $L_1 = 0,5m$

$$F_{y_1} = 800\text{N} \quad (7.2.13)$$

La estructura se sujeta a la pared de hormigón del canal mediante anclaje químico. Consta de dos amarres, donde cada uno de estos posee 4 varillas roscadas de acero de 8 mm de diámetro y 80 mm de largo. Esta sujeción se detalla en un plano presentado en el anexo I.

Utilizando el catálogo [Sika, 2014], para cada anclaje químico con las varillas seleccionadas, se tiene una resistencia característica a la tracción de 12 kN y de 9,6 kN al cortante. Asumiendo que las fuerzas en cada amarre se distribuyen de manera equitativa entre cada varilla, se obtiene que están sometidos a una tracción de 0,2 kN y a un cortante de 0,1 kN. Por lo tanto, el sistema de empotramiento está muy por debajo de los límites de seguridad.

Diseño y análisis estructural de la grúa

Se realiza un diseño funcional y sencillo que cumpla con el cometido de retirar la jaula con residuos y se hace énfasis en la resistencia estructural para asegurar la estabilidad de la grúa. Se diseña en base al criterio de falla de Tresca ⁶ (o esfuerzo cortante máximo) y al criterio de Euler para el análisis de inestabilidad elástica.

El diseño de la grúa está conformado por un tubo hueco de hierro empotrado al suelo que cumple la función de pilar y una viga de hierro tipo HEB desde donde cuelga el sistema de elevación de la jaula. Ambas piezas van unidas mediante una mordaza con una articulación tipo pasador que permite la rotación de la viga hasta un ángulo de 90° en un plano paralelo al suelo. En la figura 7.14 se presenta un modelo tridimensional del sistema descrito y en el anexo I se presentan los planos.

⁶Se desprecia el esfuerzo cortante de Jouravski dado que todas las piezas tienen un largo diez veces mayor a su diámetro.



Figura 7.14: Modelo tridimensional de la grúa de recolección.

Primeramente se analizan los esfuerzos a los que se verá sometida la estructura y se considera un factor de diseño de 1,5. De manera de simplificar los cálculos se considerara que el peso propio de la viga es un fuerza puntual aplicada en su baricentro. Se procede a calcular la sección más comprometida de cada una de las piezas para su dimensionamiento.

Comenzando por la viga, se resuelve el sistema de fuerzas y se realizan los correspondientes diagramas de cuerpo libre, cortante y flector que se presentan en la figura 7.15.

Primera cardinal según z:

$$FS \cdot (m_{viga} + m_{jaula}) \cdot g = F_1 \quad (7.2.14)$$

Segunda cardinal respecto al punto 1 (extremo de la viga)

$$M = m_{viga} \cdot g \cdot \frac{L_1}{2} + m_{jaula} \cdot L_1 \quad (7.2.15)$$

Siendo $L_1 = 1,85$ m el largo de la viga, $m_{viga} = 37,74$ kg la masa de la viga y $m_{jaula} = 154$ kg la masa de la jaula llena de residuos, se llega a $F_1 = 2263,8$ N y $M = 4701,2$ Nm.

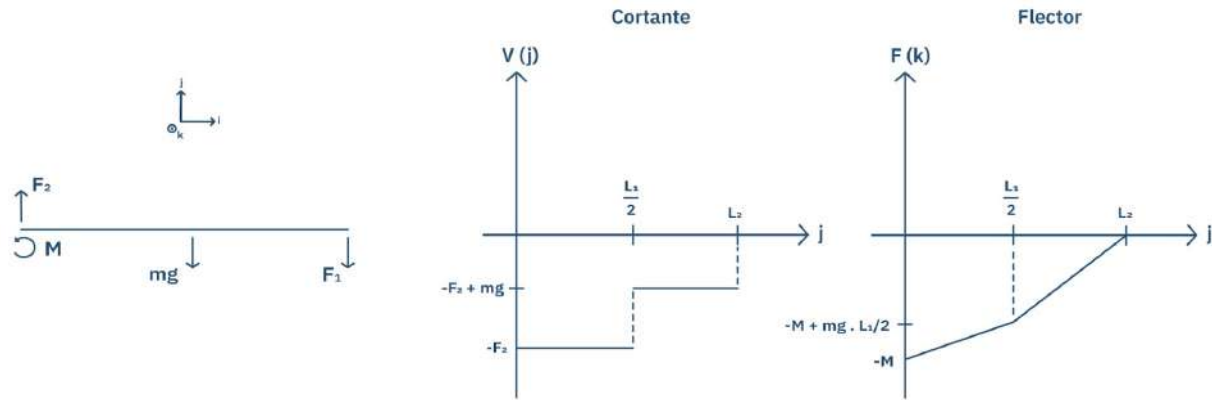


Figura 7.15: Diagrama cuerpo libre, directa y flector de la viga.

De los diagramas se observa que la sección más comprometida se encuentra en el extremo donde la viga se une con la columna. A continuación, en la figura 7.16, se presenta una figura que ilustra cómo trabaja dicha sección.

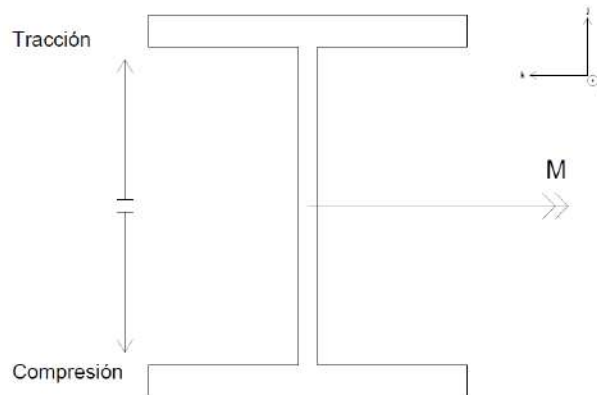


Figura 7.16: Sección mas comprometida de la viga.

El perfil se orienta de forma que su eje de mayor inercia sea paralelo al suelo. Bajo esta premisa, el análisis de la sección resulta en que las zonas más comprometidas de la sección son todos los puntos de los extremos de la viga, tanto los puntos superiores, los cuales se encuentran a tracción, como los puntos inferiores que se encuentran a compresión. Posteriormente se analiza el círculo de Mohr para determinar el esfuerzo cortante máximo en el plano de mayores esfuerzos, el cual resulta ser: $\tau_{max} = \frac{\sigma_F}{2}$.

Del catálogo de [UDELAR, 2016] se selecciona el perfil HEB de menor tamaño que cumple con las solicitaciones del sistema. El perfil seleccionado es el HEB 100.

Repitiendo el mismo análisis para la columna, de los diagramas de cuerpo libre, directa y flector, que se presentan en la digura 7.17, se determina que la sección más comprometida se encuentra en la base.

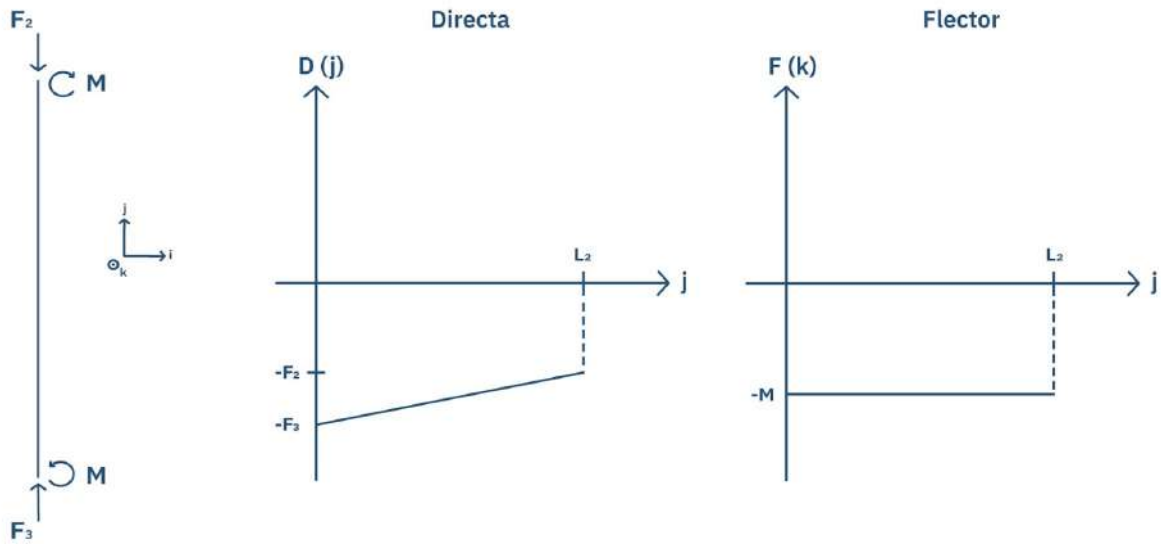


Figura 7.17: Diagrama cuerpo libre, directa y flector de la columna.

Analizando esta sección, se observa que todos sus puntos se encuentran a compresión a causa del esfuerzo de directa. Además, el esfuerzo de flexión genera un esfuerzo de compresión sobre la mitad derecha de la sección y otro de tracción sobre la mitad izquierda, lo que deja al punto A de la figura 7.18 como el punto más comprometido ya que en este se suman los esfuerzos normales de directa y flexión.

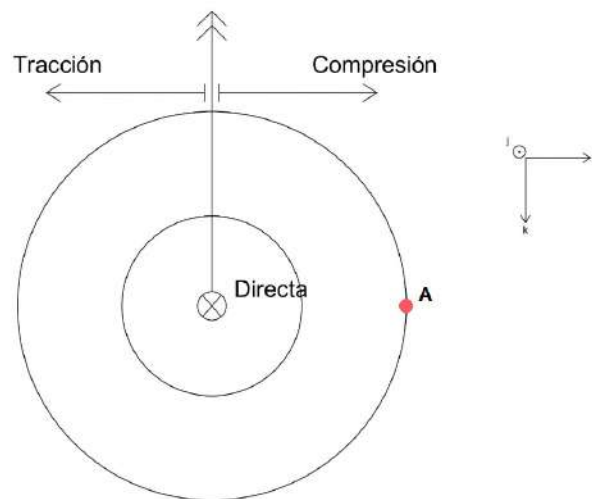


Figura 7.18: Sección más comprometida de la columna.

Posteriormente se analiza el círculo de Mohr y se concluye que el máximo esfuerzo cortante en el plano de mayores esfuerzos resulta ser: $\tau_{max} = \frac{\sigma_D + \sigma_F}{2}$.

Para culminar con el estudio del tubo, se evalúa el fenómeno de inestabilidad elástica. El análisis de este fenómeno no puede ser pasado por alto dado que se trata de un cuerpo esbelto que se encuentra a compresión. Para la determinación del tubo correcto, se calcula la carga crítica para cada uno de los tubos

del catálogo y se compara la misma con la carga de directa a la que se encuentra sometido el tubo de la estructura. Se termina optando por aquel que presenta la menor carga crítica admisible.

Primero se debe determinar la fuerza crítica de pandeo:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} \quad (7.2.16)$$

Siendo P_{cr} la fuerza crítica, E el módulo de elasticidad, I el momento de inercia de la sección, K el factor de longitud efectiva y L el largo del tubo.

La fuerza de compresión a la que hay que comparar contra P_{Cr} , debe tener en cuenta la directa y el momento flector. Se calcula de la siguiente manera:

$$F_{pandeo} = F_{z_1} + \frac{M \cdot d}{I} \cdot A \quad (7.2.17)$$

Siendo d el radio del tubo para este caso.

Finalmente, el conjunto de restricciones para la selección del tubo son:

$$P_{cr} > F_{pandeo} \quad (7.2.18)$$

$$\tau_{maxadmissible} > \tau_{max} = \frac{\sigma_D + \sigma_F}{2} \quad (7.2.19)$$

Al igual que para el perfil HEB, de los tubos disponibles en el catálogo [Appelsa, 2023] se determina cual sería el tubo de menor diámetro que cumpla con las solicitaciones del sistema. Se llega a la conclusión de que las exigencias del pandeo son mayores y por tanto se termina eligiendo el diámetro a partir de esta restricción. Se elige el tubo #2028: $D_{ext} = 108mm$ y $D_{int} = 58mm$. Se adjunta en el anexo H una tabla con los cálculos realizados y la columna seleccionada.

Como se comenta previamente, la unión entre la columna y la viga se realiza mediante una mordaza con articulación tipo pasador. Dicha mordaza consta de dos placas de acero inoxidable de 170 x 170 mm soldadas a la columna, para evitar el desplazamiento tangencial a la columna, y cuatro varillas roscadas que sujetan las placas mediante tuercas, para evitar la rotación según el eje perpendicular. Para seleccionar las varillas se asume que deben soportar todo el momento calculado previamente, por lo que las dos varillas superiores, que se encuentran sometidas a tracción, resultan las más comprometidas ya que las inferiores, sometidas a compresión, cuentan con la colaboración de la viga para contrarrestar dicha compresión. Teniendo esto en cuenta se calcula la tracción que deben soportar las varillas:

$$M = h \cdot T \quad (7.2.20)$$

Donde $M = 4701,2$ N es el momento calculado previamente, $h = 135$ mm la distancia entre las varillas

superiores e inferiores. La tracción total que deben soportar las dos varillas superiores resulta en $T = 34,8$ kN, por lo que cada varilla debe resistir 17407,5 N. Entonces, considerando un factor de seguridad $FS = 2$, se seleccionan varillas de acero inoxidable austenítico, de 10 mm de diámetro, clase de fuerza 50 según la norma DIN 976, con resistencia a la tracción de 500 N/mm^2 .

Para el eje de articulación se propone un pasador de acero grado 37, de 18 mm de diámetro. La verificación se realiza mediante el programa Inventor, como se presenta en la figura 7.19, con resultado satisfactorio para un factor de seguridad $FS = 2$ en las cargas introducidas.

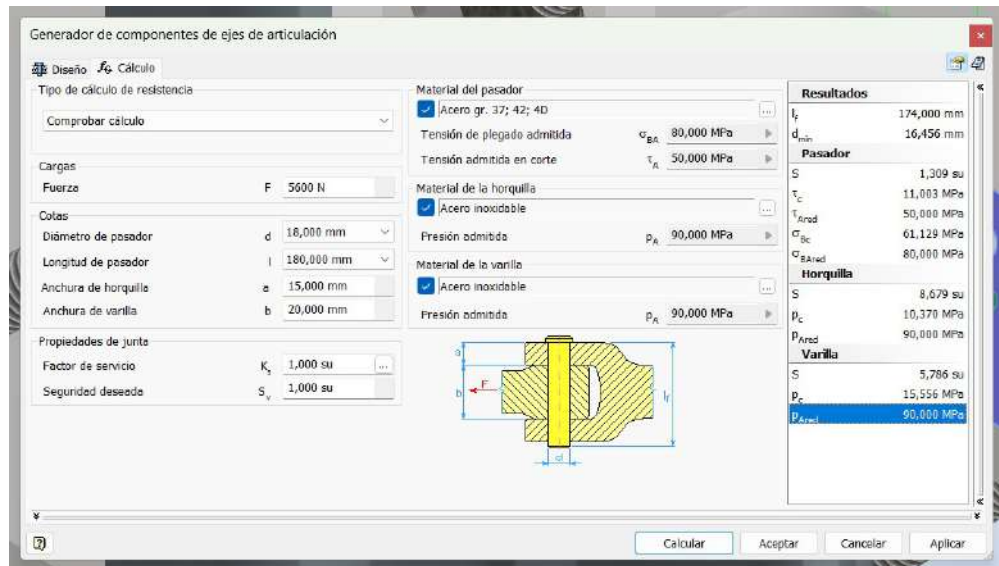


Figura 7.19: Verificación de articulación mediante programa Inventor.

Es necesario garantizar una unión resistente entre la base de la grúa y el bloque de hormigón sobre la cual estará situada. Para esto se utiliza una platina cuadrada de 30×30 cm y $1/2''$ de espesor con 4 varillas de acero austenítico de 12 mm de diámetro.

Considerando el momento en la base de la grúa y tomando en cuenta una distancia de 20 cm entre varillas, las que estén sometidas a tracción deberán soportar una carga de 11,6 kN siendo la resistencia característica de las mismas 39,3 kN, siguiendo la normativa DIN 976, por lo que, se encuentran del lado seguro.

En cuanto al dado de hormigón sobre el que se coloca la estructura de la grúa, se considera el dimensionamiento según el método de Sulzberguer. Se adjunta en el anexo la planilla para el calculo H.2. Se concluye que con una base de $1 \times 1 \times 1$ m el factor de seguridad es de 1,8 por lo que se considera apropiada para la aplicación.

Conclusiones sobre métodos de recolección

La jaula se termina definiendo como el sistema óptimo para realizar la acumulación y extracción de los residuos para esta aplicación en el Arroyo Miguelete. Esto se debe principalmente a la diferencia de costos

de cada uno de estos sistemas. El costo para la cinta transportadora se estima con una base aproximada de 16000 USD, costo que se determina mediante el intercambio con la empresa Gómez Haedo, especialistas en cintas transportadoras para la industria. Mientras la cinta transportadora presenta un costo elevado, la jaula se presenta como una solución relativamente económica, con un costo aproximado que ronda entre los 4000 y 5000 USD. Si bien a priori se estima que la cinta presenta mayores ventajas las mismas no son de una característica indispensable para la situación actual del arroyo Miguelete por lo que no compensarían esta gran diferencia en la inversión.

7.2.5. Sistema de anclaje

Se requiere de un sistema de anclaje que garantice la permanencia del tubo en el fondo del arroyo. Para esto se opta por la solución que se plantea en [Mascha and Christensen, 1983]: se sujeta el tubo mediante semi aros de acero inoxidable unidos a muertos de anclaje de hormigón colocados cada 1 m (para evitar que el tubo se arquee) como se observa en la figura 7.20. Siguiendo este criterio, dado que el tubo es de 28,2 m, es necesario colocar 27 bloques de hormigón.

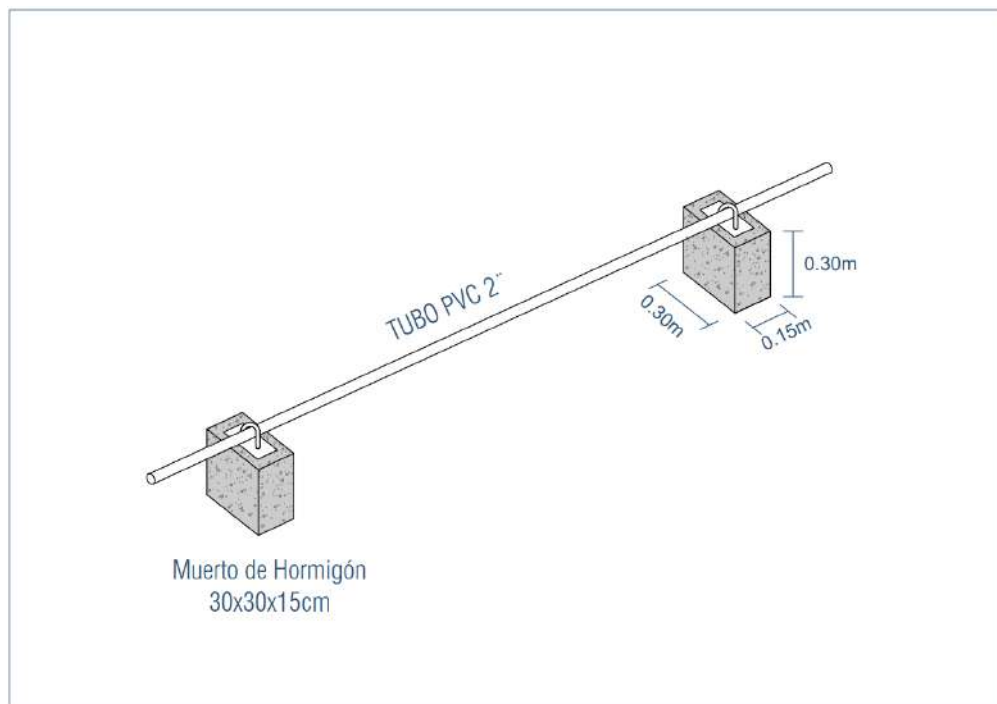


Figura 7.20: Esquema del sistema de anclaje.

Para garantizar el correcto funcionamiento del anclaje, es necesario asegurarse que la posición del tubo se mantenga fija tanto en el eje horizontal como vertical. Se proponen muertos de hormigón de 0,15 x 0,30 x 0,30 m y se plantea enterrarlos 20 cm. La verificación se realiza por medio de un balance de fuerzas al tubo y a los muertos, como se presenta en las figuras 7.21 y 7.22.

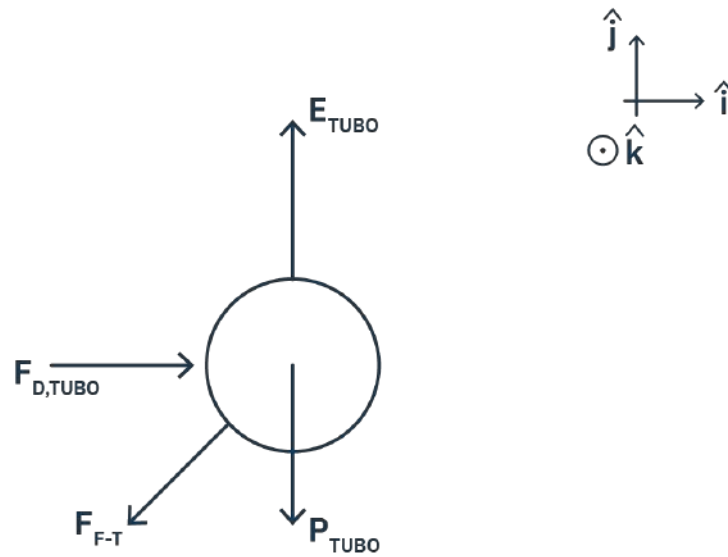


Figura 7.21: Diagrama de cuerpo libre del tubo.

Balace de fuerzas al tubo:

$$\begin{aligned}
 \hat{i}) \quad F_{M-T} \hat{i} &= F_{D,tubo} \\
 \hat{j}) \quad F_{M-T} \hat{j} &= E_{tubo} - P_{tubo}
 \end{aligned}
 \tag{7.2.21}$$

Donde F_{M-T} es la fuerza que realizan los 27 muertos sobre el tubo, $F_{D,tubo}$ es la fuerza de drag que realiza el flujo de agua sobre el tubo, E_{tubo} es el empuje sobre el tubo y P_{tubo} el peso del mismo.

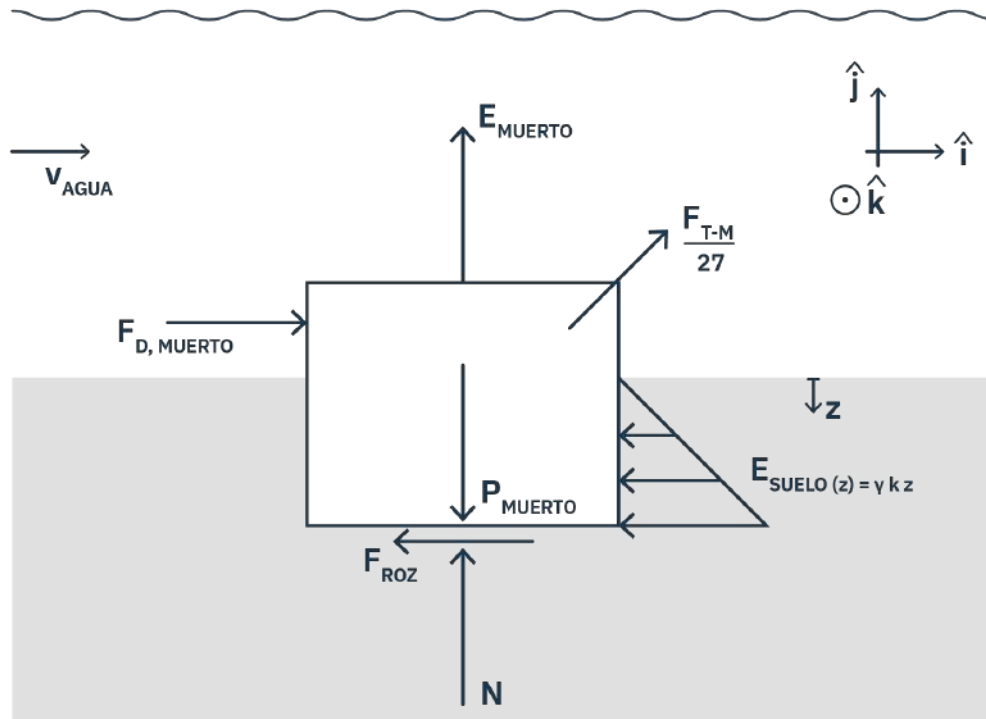


Figura 7.22: DCL muerto de anclaje.

Balace de fuerzas a un muerto de hormigón:

$$\begin{aligned}
 \hat{i}) \quad E_{suelo} + F_{Roz} &\geq F_{D,muertos} + \frac{F_{T-M} \hat{i}}{27} \\
 \hat{j}) \quad N &= P_{muerto} - E_{muerto} - \frac{F_{T-M} \hat{j}}{27}
 \end{aligned}
 \tag{7.2.22}$$

Para verificar la no flotabilidad del sistema, es necesario asegurarse que la normal es mayor a cero.

Considerando una densidad del PVC de 1400 kg/m^3 , un espesor de tubo de $0,004 \text{ m}$ y despreciando el peso del aire, se obtiene que el tubo pesa $P_{tubo} = 15,2 \text{ N}$. Dado que el volumen total sumergido del tubo ⁷ es $0,321 \text{ m}^3$, el empuje E sobre este resulta en $321,0 \text{ N}$. A partir de la ecuación 7.2.21, se calcula que la fuerza vertical descendente que deben realizar 27 muertos sobre el tubo, para mantenerlo en equilibrio, debe ser $F_{M-T} \hat{j} = 305,8 \text{ N}$.

Por acción y reacción, la fuerza vertical ascendente que realiza el tubo sobre los muertos es igual y opuesta a la calculada. Esta fuerza ascendente, denominada F_{T-M} , se distribuye equitativamente sobre los 27 muertos. Dadas las dimensiones propuestas se tiene que el empuje de un muerto E_{muerto} es de $132,2 \text{ N}$ y, considerando una densidad del hormigón de 2400 kg/m^3 , se obtiene que el peso P_{muerto} es de $317,5 \text{ N}$. De este modo, a partir de la ecuación 7.2.22, se calcula que la normal N tiene un valor de $173,9 \text{ N}$. Se considera un factor de seguridad $FS = 2$, sobre la condición de no flotabilidad, para ello se duplica la fuerza ascendente que recibe el cuerpo (empuje del muerto y fuerza del tubo). De este modo se llega a

⁷El diámetro exterior promedio de un tubo de PVC de 2" es de 2,32".

una normal $N' = 30,4 \text{ N}$, lo indica que el sistema no se desprende del fondo.

Para verificar que el sistema no es arrastrado por la corriente de agua, se debe cumplir la desigualdad presentada en la ecuación 7.2.22.

Análogamente al análisis de flotabilidad, primero se debe calcular la fuerza que realiza el tubo sobre el muerto, en este caso su componente horizontal, la cual es igual en módulo a la fuerza de drag que realiza el agua sobre el tubo como se presenta en el balance 7.2.21.

Para contrarrestar la fuerza horizontal del tubo y la fuerza de drag que realiza el agua sobre la sección no enterrada del muerto, se tiene el empuje lateral que realiza el suelo sobre la sección enterrada del muerto y el rozamiento entre la base del mismo y el suelo.

Las expresiones para la fuerza de drag, el empuje lateral del suelo ⁸ y el rozamiento son respectivamente:

$$F_{Drag} = C_D \frac{1}{2} \rho \cdot v_{agua}^2 \quad (7.2.23)$$

$$E_{Suelo} = \gamma k z \quad (7.2.24)$$

$$F_{roz} = \mu N \quad (7.2.25)$$

Se considera un coeficiente de drag C_D de 1,05 para los muertos y de 0,35 para el tubo [Carvill, 2014], un peso específico del suelo ⁹ $\gamma = 8 \text{ kN/m}^3$, la altura del muerto enterrada $z = 0,2$, un ángulo de fricción interna del suelo de φ , un coeficiente de empuje en reposo de $k = 0,95 \cdot \text{sen}(\varphi)$ [Brooker and Ireland, 1965] y un coeficiente de rozamiento $\mu = \text{tg}(\varphi)$. Dado que el Miguelete presenta un suelo arcilloso de poca densidad, muy húmedo y poco compactado, se tiene que el ángulo de fricción interna será menor a 30° y probablemente cercano a 0° , por lo tanto se evalúan los ángulos 0° , 10° y 20° y se elige el correspondiente a la situación más restrictiva.

Utilizando un factor de seguridad $FS = 2$ se obtiene como resultado de la desigualdad presentada en la ecuación 7.2.22 que la suma del empuje y el rozamiento del suelo debe ser mayor o igual a $28,9 \text{ N}$.

$$FS \cdot (F_{D,muertos} + \frac{F_{M-T} \hat{i}}{27}) = 28,9 \text{ N} \quad (7.2.26)$$

Entonces, para $\phi = 0^\circ$ se tiene:

$$F_{Roz} = 0 \text{ N} \quad (7.2.27)$$

⁸No se considera el empuje activo del suelo, que se presentaría en el sentido de la corriente, debido a que este es despreciable en comparación al pasivo presente del lado opuesto.

⁹El peso específico del suelo utilizado se basa en considerar 18 kN/m^3 para suelos sin compactar y restarle 10 kN/m^3 por el empuje del agua

$$E_{Suelo} = 45,6N \quad (7.2.28)$$

Para $\phi=20^\circ$:

$$F_{Roz} = 63,3N \quad (7.2.29)$$

$$E_{Suelo} = 29,2N \quad (7.2.30)$$

Por lo que puede verse que la situación más restrictiva se encuentra cuando el ángulo de fricción interna del suelo es de 0° , y aún para esta situación se sigue verificando la desigualdad por lo que se puede asegurar que el sistema no es arrastrado por el flujo de agua.

Es importante considerar que con el paso del tiempo la erosión puede provocar que los muertos se desentierren. Por lo tanto es necesario una revisión periódica y luego de grandes precipitaciones.

7.2.6. Dimensionado Eléctrico

Para esta sección se realizan los cálculos para el correcto seleccionado de cables y llaves para realizar la instalación del sistema. Con este objetivo se utiliza el reglamento de baja tensión de UTE [UTE, b]. Para el dimensionamiento de las llevas termomagnéticas se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

$$I^2 \cdot t = (K \cdot S)^2 \quad (7.2.31)$$

$$PdC \geq I_{cc,max} \quad (7.2.32)$$

$$I_{apertura} \cdot 1,45 \leq I_{admisible} \quad (7.2.33)$$

$$I_{diseno} \geq I_n \geq I_{admisible} \quad (7.2.34)$$

Siendo K un factor que depende del conductor y su aislamiento, I apertura la corriente que dispara la llave, I admisible la corriente que resiste el conductor sin quemarse y la I diseño la corriente que efectivamente circula por el sistema.

En el anexo J se presentan las cuentas para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas consideradas para los distintos puntos de la instalación y la verificación de los cables seleccionados considerando la corriente máxima admisible y las caídas de tensión permitidas para motores y luminaria.

Debajo se presenta el diagrama unifilar de la instalación eléctrica.

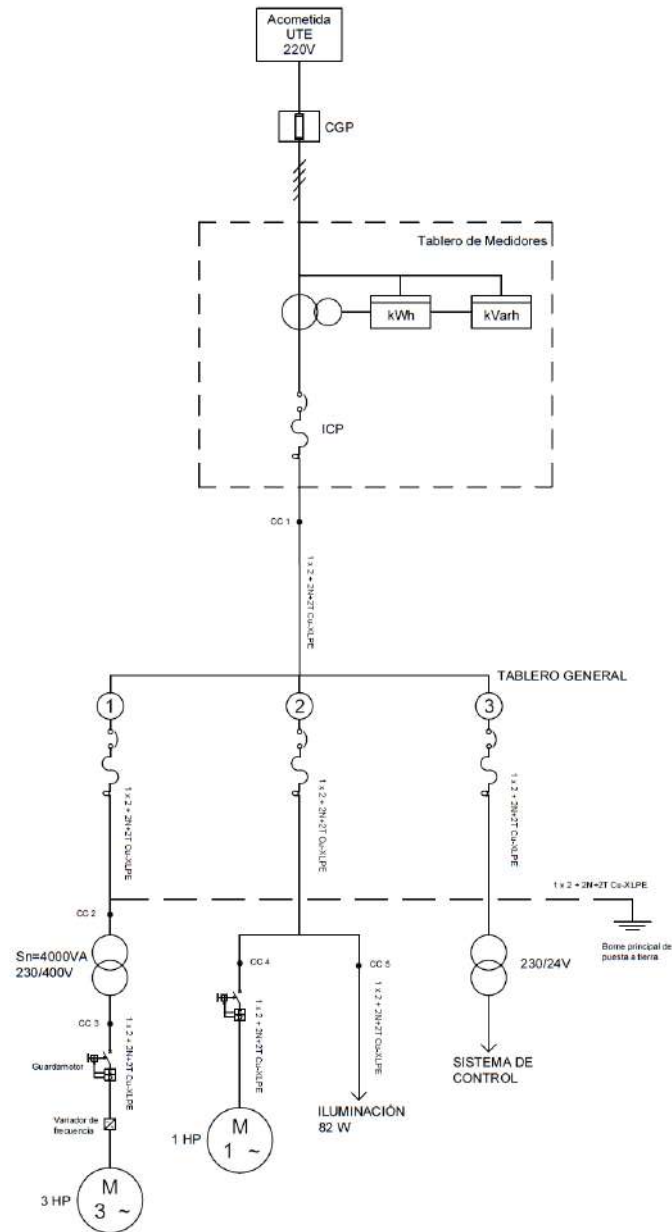


Figura 7.23: Diagrama unifilar.

7.2.7. Otros

Acceso al sistema de recolección

Si bien los alrededores del Arroyo Miguelete son más accesibles que en los otros cauces analizados, las pendientes que llevan a la orilla son demasiado pronunciadas y dificultan el acceso de vehículos hasta la misma. Por esto resulta necesaria una obra civil para construir un camino que dé acceso a los camiones o camionetas que se encargan de transportar los residuos hasta el sitio de deposición final.

Se presupuestan costos de limpieza, nivelación, retiro de capa vegetal, relleno y compactación con tosca y balastro, para la construcción de un camino desde la “rambla” hasta el arroyo. Este camino será de 4 metros de ancho y una extensión total que consta de tres tramos. El primero, un tramo plano de 10 metros a las orillas del arroyo para permitir el estacionamiento del camión y la operación de traspaso de basura desde el sistema recolector de basura hacia el sector de carga del camión. El segundo tramo es una subida de 15 metros de desarrollo y una pendiente de 15 grados que conecta el nivel de la orilla del arroyo que se encuentra a una cota negativa de 4 metros con el nivel de la calle a una cota de 0 metros. Finalmente, un tramo 35 metros que conecta el camino con la vía pública para terminar de consolidar el camino de acceso hacia la orilla del arroyo.

Sala de máquinas

Es necesario incluir una sala de máquinas para resguardo del equipo de funcionamiento de la barrera, tanto por motivos de seguridad como climáticos. Con este fin, se selecciona un contenedor de 20 pies dentro del cual se ubica el compresor con toda su instrumentación, las herramientas necesarias para realizar mantenimiento, repuestos y una mesa de trabajo.

Previendo posibles crecidas del arroyo, se coloca el contenedor a una cota de 3,5m por encima del nivel del agua, de esta manera la sala de máquinas está segura para las crecidas con período de retorno de de dos años. Estas crecidas se encuentran detalladas en el Proyecto de Grado de Ingeniería Civil Hidráulica/Ambiental, Informe de Modelación Hidrológica e Hidráulica Proyecto Ribera del Miguelete [Jaurena et al., 2018b].

Presupuesto

A partir de lo comentado en este capítulo, se realiza una estimación de los costos de todo lo que conlleva la realización de este proyecto en el sitio seleccionado. En la tabla 7.3 se detallan los costos considerados para la presupuestación del proyecto según el concepto al que refieren, en las tablas sucesivas se presentan las tablas correspondientes al detalle de cada concepto.

Concepto	Costo USD\$
Barrera de Burbujas	15.284
Sistema de recolección (Grúa)	804
Sistema de recolección (Jaula)	1.756
Sistema de control	4.081
Materiales eléctricos	255
Mano de obra y traslado	6.412
Otros	5.185
TOTAL USD\$	33.777

Cuadro 7.3: Presupuesto general.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
BARRERA DE BURBUJAS						
Soplante Atlas Copco	1		15.000,0	-	15.000	ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6
Tubo de PVC flexible 2" (m)	45		4,4	-	198	
Hormigón (m ³)	0,4	5.500,0		2.200,0	-	
Varilla roscada de 5 mm (m)	5	250,0		1.250,0	-	
SUBTOTAL		\$ / USD\$		3.450	15.198	
TOTAL		USD\$			15.284	

Cuadro 7.4: Presupuesto - Barrera.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
SISTEMA DE RECOLECCIÓN (Grúa)						
Perfil HEB 100 (m)	1,85	2.690,0		4.976,5	-	
Columna (m)	2		150,0	-	300	Tubo de hierro $\Phi_{ext} = 108$ mm, $\Phi = 58$ mm
Varilla roscada $\Phi = 12$ mm (m)	1	1.515,0		1.515,0	-	
Varilla roscada $\Phi = 10$ mm (m)	1	976,0		976,0	-	
Motor NEO AP9400	1		250,0	-	250	
Pintura anticorrosiva	1	2.700,0		2.700,0	-	Rinde 15 m ²
SUBTOTAL		\$ / USD\$		10.168	550	
TOTAL		USD\$			804	

Cuadro 7.5: Presupuesto - Grúa.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
SISTEMA DE RECOLECCIÓN (Jaula)						
Varilla roscada $\Phi = 8$ mm (m)	1	763,0		763,0	-	
Metal desplegado (m)	2,2	9.480,0		20.856,0	-	
Malla de acero inoxidable (m ²)	2,6		90,0	-	234	
Perfil IPN 100 de acero inox (m)	6	3.500,0		21.000,0	-	
Caño cuadrado de acero inox (m)	7	1.200,0		8.400,0	-	
Flotadores	4	2.500,0		10.000,0	-	Tanques de aceite soldados
SUBTOTAL		\$ / USD\$		61.019	234	
TOTAL		USD\$			1.756	

Cuadro 7.6: Presupuesto - jaula.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
SISTEMA DE CONTROL						
Válvula de control de presión	1		400,0	-	400	SMC serie ITV301
Manómetro de bourdon	1		5,5	-	6	
Transmisor de presión	1		200,0	-	200	Danfoss MBS 4010 0-400 mbar
Caudalímetro de efecto Doppler	1		3.300,0	-	3.300	SonTek-1Q
Controlador de proceso	1		100,0	-	100	NOVUS N20K48
Cámara videograbadora	1		75,0	-	75	
SUBTOTAL		\$ / USD\$		-	4.081	
TOTAL		USD\$			4.081	

Cuadro 7.7: Presupuesto - Sistema de control.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
MANO DE OBRA Y TRASLADOS						
Soldadura y corte	1	70.000,0		70.000,0	-	
Traslados	1	17.500,0		17.500,0	-	
Grúa para instalación	1		400,0	-	400	
Instalación de Barrera	1	50.000,0		50.000,0	-	
Instalación de Sistema de recolección	1	10.000,0		10.000,0	-	
SUBTOTAL MO y Traslado		\$ / USD\$		147.500	400	
LEYES SOCIALES		\$ / USD\$		93.600		
TOTAL		USD\$			6.412	

Cuadro 7.8: Presupuesto - Mano de obra y traslados.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
MATERIALES ELÉCTRICOS						
Proyector led 40 W	1		60,0	-	60	
Tubo de luz led 16 W	2		13,0	-	26	
Jabalina	1		24,0	-	24	
Diferencial	1		40,0	-	40	
Termomagnética	3		35,0	-	105	
Cable 1 x 2 + 2N+2T Cu-XLPE	120	13,0		1.560,0	-	
Caño espiral diflex 12 mm	90		2,4	-	216	
SUBTOTAL		\$ / USD\$		1.560	255	
TOTAL		USD\$			294	

Cuadro 7.9: Presupuesto - Materiales eléctricos.

Descripción de materiales	Cantidad	Costos USD\$ /Pesos				Observaciones
		Unitario \$	Unitario USD\$	Total \$	Total USD\$	
OTROS						
Caminería	1	120.000,0		120.000,0	-	
Contenedor 20 ft	1		2.133,0	-	2.133	
Bases para contenedor	6	400,0		2.400,0	-	
SUBTOTAL		\$ / USD\$		122.400	2.133	
TOTAL		USD\$			5.185	

Cuadro 7.10: Presupuesto - Otros.

Como puede observarse, el costo total presenta un monto de aproximadamente 33.777 USD. Teniendo en cuenta la bibliografía [Helinski et al., 2021] este sistema, implementado en Uruguay, no se encontraría catalogado como un sistema "Low Cost", donde se considera un sistema "Low Cost" a aquellos cuyos costos de implementación se encuentran por debajo de los 10.000 USD.

Cabe destacar que si no se tuviera en cuenta los costos de caminería necesarios por la ubicación del sistema el total se reduciría a 30.700 USD. Además, si se comprueba que la alternativa "Sistema libre" ofrece buenos resultados, el ahorro sería de aproximadamente 4.000 USD extra, resultando en un proyecto de aproximadamente 26.000 USD. Este ahorro se corresponde con los ítems presentados en la tabla 7.7, referida al sistema de control.

Capítulo 8

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el proyecto de barrera de burbujas, se concluye que este sistema es altamente efectivo en la retención de residuos en cursos de agua si se logra un diseño adecuado para el contexto en el que se aplique. Esto supone una alternativa innovadora y prometedora para la mejora de la calidad del agua y la protección del medio ambiente en áreas donde la contaminación por residuos sólidos es un problema significativo.

Se determina a partir de los ensayos de caracterización y de la bibliografía estudiada que mayores presiones se corresponden con mayores velocidades de ascenso de las burbujas, lo que se asocia a una mayor retención de residuos. Es ahí cuando surge el compromiso entre una capacidad de retención elevada utilizando la mínima presión necesaria de manera de tener el menor consumo energético posible.

No obstante, tras la realización de los distintos ensayos, se concluye que es importante tener en cuenta que la efectividad de la barrera de burbujas puede variar en función de diversos factores, como la densidad de los residuos, el tirante y la velocidad del agua en el curso. Residuos de alta densidad, niveles de agua bajos y altas velocidades de agua dificultan la retención de residuos. Por lo tanto, se requiere una evaluación exhaustiva y un monitoreo constante para determinar su rendimiento en diferentes contextos y condiciones y de este modo manipular las variables controlables para lograr el mejor desempeño posible.

Mediante el ensayo con esferas de distinta densidad se comprueba que la mayoría de los residuos o bien viajan a nivel de superficie, o bien se hunden hasta el fondo. Esto es beneficioso ya que la efectividad de la BdB es máxima a nivel superficial. En condiciones de agua turbulenta se prevee que esto sea más variable ya que la corriente generaría un movimiento aleatorio de los sólidos, provocando que un porcentaje de aquellos que circulan a niveles intermedios puedan atravesar la barrera.

Con respecto al diseño, cabe destacar que la selección del tubo para el sistema de barrera de burbujas se basa en la experimentación y la comprobación de los buenos resultados del mismo. Quedará pendiente la verificación de las condiciones óptimas de diámetro de orificio, espaciamiento de orificios y material del tubo para llegar también a la mejor eficiencia energética. Por otro lado, el sistema de recolección diseñado resulta acorde para el contexto del sitio elegido, pero debería rediseñarse para condiciones distintas.

Para la selección del compresor es importante destacar que mediante lo determinado en los ensayos,

es necesario lograr una presión mínima para lograr la detención de residuos. Se concluye que la mejor opción es la utilización de un compresor soplante de lóbulos en lugar de un reciprocante (como se utilizó en los ensayos). Esta decisión se basa en que estos equipos logran entregar los altos caudales que demanda la barrera y lo hacen a menores presiones, lo que resulta en un menor consumo energético. Se plantean distintas alternativas respecto al control de presión. En primera instancia se considera el sistema de control mediante válvula como el más apropiado debido a que este sistema de válvula fue testeado en el laboratorio con buenos resultados. pero quedará pendiente evaluar el desempeño de los otros dos sistemas.

Luego de la evaluación de costos, se determina el sistema como una alternativa viable para su implementación. Aún así cabe destacar que debido a los costos del país y la necesidad de importación de ciertos componentes como el compresor, el sistema no se encuentra como se menciona en la bibliografía [Helinski et al., 2021], como un sistema "low cost", donde están los sistemas con un presupuesto por debajo de los 10.000 USD. Aún así pese a las grandes ventajas presentadas por este método de retención de residuos, muchas de estas ventajas no serían provechosas en los cursos de agua evaluados en Montevideo. Actualmente, en el Arroyo Miguelete (considerado el punto óptimo dentro de los evaluados), no existe circulación de vehículos acuáticos, la presencia de fauna es mínima y la presencia de residuos es muy alta, volviendo la ventaja de la capacidad de retener microplásticos un adicional no indispensable para la condición actual. Por esto que se menciona, existen métodos que exigen un presupuesto menor, que para las condiciones actuales serían igual de gran ayuda. En este punto resulta importante resaltar que, si bien no se aprovecharía en un principio la ventaja de permitir el flujo libre de vida acuática (debido a su escasa presencia), el hecho de inyectar aire en el cuerpo de agua sí supone una ventaja, ya que favorece las condiciones de vida para la biota superior al evitar que ocurran fenómenos de anaerobia a causa de la presencia en exceso de contaminantes.

Cabe destacar que en el caso de optar por la opción "Sistema libre" y por lo tanto no utilizar un sistema de control para la barrera de burbujas (presión fija en 300 mbar), se tendría un costo inicial 7500 USD menor aproximadamente. Este ahorro se debe a que no es necesario incluir elementos de control y se podría optar por un compresor sin variación de velocidad. Por lo tanto es una opción que debe ser evaluada.

Adicionalmente se evaluó la posibilidad de llevar a cabo un ensayo piloto de este sistema e implementarlo en el arroyo Miguelete. Se mantuvieron conversaciones con la Intendencia de Montevideo para acoplar nuestro sistema al proyecto Maggiolo (actualmente en curso) pero debido a que esta posible financiación no logra obtenerse dentro de los plazos estipulados para el proyecto de fin de carrera, esta implementación no pudo llevarse a cabo en esta etapa.

En el presente estudio se llevaron a cabo visitas a diferentes cursos de agua en la ciudad de Montevideo, con el objetivo de identificar aquellos que cumplieran con las especificaciones necesarias para la aplicación de una barrera de burbujas. En estas visitas, se pudo observar con preocupación que gran parte de los cursos de agua se encuentran en un estado crítico debido a la acumulación de residuos en sus alrededores. Las imágenes de los cursos visitados denotan la presencia de residuos de diversa naturaleza como plásticos, envases, residuos orgánicos, entre otros. Estos residuos son un grave problema ambiental, ya que no solo contaminan visualmente los alrededores del curso de agua, sino que también pueden generar problemas de salud pública y dañar la fauna y flora que habita en estos ecosistemas acuáticos. Es importante destacar que la presencia de residuos en los cursos de agua no solo es un problema local,

sino que se trata de una problemática global que afecta a muchos otros cuerpos de agua en el mundo. Por esta razón, se hace necesario tomar medidas para reducir la cantidad de residuos que se arrojan a estos cuerpos de agua y para mejorar su gestión y tratamiento. Frente a esto, se concluye que la barrera de burbujas es un buen complemento y/o alternativa para los métodos de recolección tradicionales debido a su buen desempeño. De todos modos es importante recalcar que el el abordaje a esta problemática no puede limitarse a la recolección sino que se debe afrontar desde un enfoque más profundo.

Apéndice A

Calibración del caudalímetro

A.1. Descripción del instrumento

Para llevar a cabo la medición de caudal de aire, se optó por utilizar un anemómetro digital modificado para funcionar como un caudalímetro de turbina. Este instrumento consta de una turbina ubicada en el interior de la tubería (figura A.1), con su eje de rotación alineado en la misma dirección del flujo de aire. De esta manera, la turbina es impulsada por el aire que fluye a través de la tubería, generando una variación en el campo magnético que depende de la velocidad de rotación y, por lo tanto, de la velocidad del aire. Esta información es recogida por un dispositivo externo a la tubería, que indica la velocidad medida del aire.



Figura A.1: Turbina del caudalímetro

A.2. Calibración

El banco de calibración (figura A.2) consta de un compresor que alimenta una tubería donde se colocan los siguientes elementos: dos válvulas (V1 y V2), una placa orificio (PO), el caudalímetro a calibrar (C), tres puntos para medir presión (P1, P2 y P3) y un termómetro (T). Para medir P3 se coloca un micromanómetro digital marca Fluke y para medir P2 y P1 se coloca un tester de velocidad de aire, marca Velocicalc, modelo 9565. La configuración caudalímetro y micromanómetro es tal cual se utiliza en el ensayo. El Velocicalc mide la presión estática en P1 y la diferencia de presión entre el punto aguas arriba (P1) y el punto aguas abajo (P2) de la placa orificio. El termómetro se utiliza para medir la temperatura del aire a la salida.

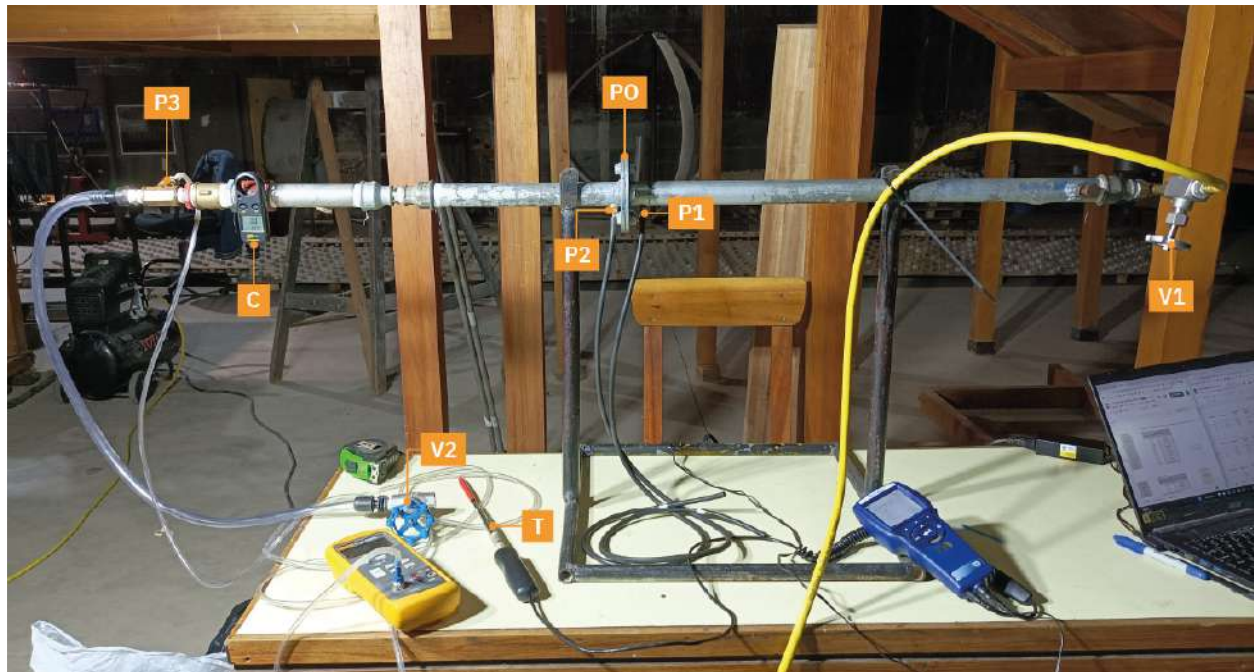


Figura A.2: Banco de calibración para el caudalímetro

Con esta configuración se simulan once puntos con presiones P3 en el rango entre 50 y 150 mbar y caudales tales que las indicaciones del caudalímetro sean entre 1,9 y 3,1 m/s (rangos de presión y velocidad utilizados en el ensayo). Para cada punto, con las medidas de presión P2 y P3, y utilizando la ecuación de la placa orificio, se calcula el caudal de aire.

El resultado de la calibración es una recta que relaciona la indicación del anemómetro (en m/s) con el caudal real circulante (en l/min), todo en condiciones normales. Esta recta tiene la siguiente expresión: $Q_N = 26,95I_N - 5,04$, donde I_N es la indicación del anemómetro en condiciones normales y Q_N es el caudal obtenido en condiciones normales. Se representa la recta a continuación en la figura A.3.

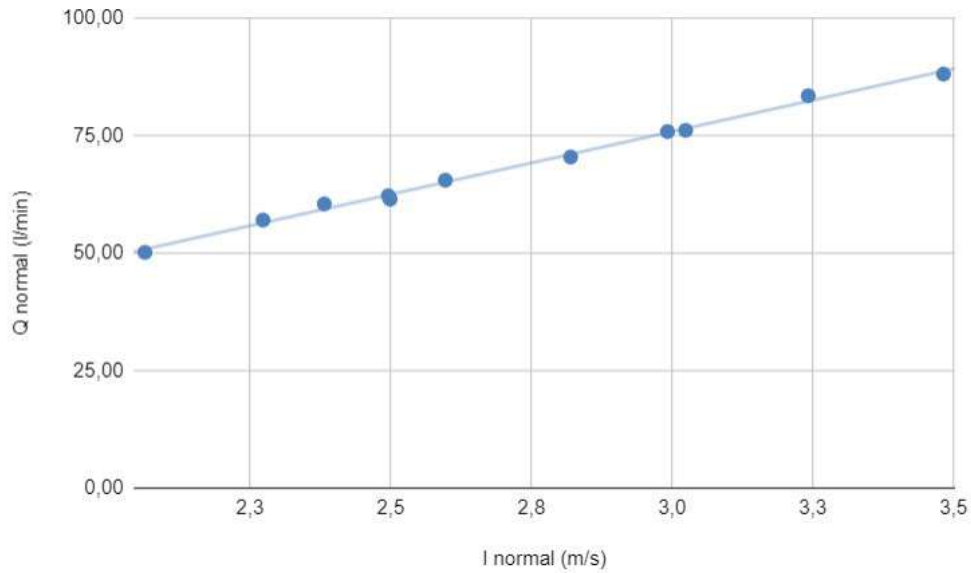


Figura A.3: Curva de calibración

A.3. Descripción del problema presentado y solución

Durante los primeros ensayos, se observaron mediciones inciertas del caudalímetro, especialmente para caudales más altos. Después de realizar varias pruebas, se determinó que el problema radicaba en un acoplamiento ubicado aguas arriba de la turbina. Este acoplamiento generaba un flujo divergente y, por lo tanto, turbulencias que afectaban las mediciones obtenidas.

Para solucionar el problema, se instaló un enderezador de flujo, formado por una serie de pajitas, antes del caudalímetro A.4.



Figura A.4: Enderezador de flujo

Apéndice B

Reporte de datos: ensayos del prototipo en el canal de hormigón

B.1. Ensayo con agua en movimiento y plásticos aleatorios

	Caudal de agua (m ³ /s)	Nivel de agua (m)	Velocidad (m/s)	Presión (mbar)	% Retención
Condición 1	0,064	0,550	0,077	65	100,0%
	0,064	0,550	0,077	80	87,5%
	0,064	0,550	0,077	100	87,5%
Condición 2	0,094	0,550	0,113	65	87,5%
	0,094	0,550	0,113	80	100,0%
	0,094	0,550	0,113	100	100,0%
	0,094	0,550	0,113	150	87,5%
Condición 3	0,116	0,550	0,140	65	62,5%
	0,116	0,550	0,140	80	87,5%
	0,116	0,550	0,140	100	93,8%
	0,116	0,550	0,140	150	88,9%
Condición 4	0,117	0,430	0,182	65	21,4%
	0,117	0,430	0,182	80	92,9%
	0,117	0,430	0,182	100	69,2%
	0,117	0,430	0,182	150	94,4%
Condición 5	0,119	0,310	0,256	65	0,0%
	0,119	0,310	0,256	80	0,0%
	0,119	0,310	0,256	100	0,0%
	0,119	0,310	0,256	150	0,0%
Condición 6	0,076	0,310	0,163	65	55,6%
	0,076	0,310	0,163	80	66,7%
	0,076	0,310	0,163	100	82,4%
	0,076	0,310	0,163	150	94,1%
Condición 7	0,138	0,525	0,175	65	26,3%
	0,138	0,525	0,175	80	66,7%
	0,138	0,525	0,175	100	77,8%
	0,138	0,525	0,175	150	89,5%
	0,138	0,525	0,175	180	100,0%
	0,138	0,525	0,175	195	100,0%
	0,138	0,525	0,175	190	88,9%

B.2. Ensayo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades

	Caudal de agua (m ³ /s)	Nivel de agua (m)	Velocidad del agua (m/s)	Presión de aire (mbar)	Caudal de aire (m ³ /s)	% Retencion
Condición 1	0,075	0,305	0,164	80	0,00127	73,33%
	0,075	0,305	0,164	100	0,00145	93,33%
	0,075	0,305	0,164	150	0,00186	86,67%
Condición 2	0,145	0,525	0,184	80	0,00095	100,00%
	0,145	0,525	0,184	100	0,00127	100,00%
	0,145	0,525	0,184	150	0,00172	100,00%
Condición 3	0,146	0,44	0,221	80	0,00109	100,00%
	0,146	0,44	0,221	100	0,00136	100,00%
	0,146	0,44	0,221	150	0,00177	100,00%

Cuadro B.2: Resultados del ensayo con agua en movimiento y plásticos uniformes de distintas densidades

Apéndice C

Sistema alternativo de recolección cinta transportadora

Cinta transportadora

Otro método de recolección propuesto se trata de una cinta transportadora. Con esta alternativa se tiene un sistema de funcionamiento continuo, de modo tal que los residuos son extraídos del curso de agua apenas llegan a la zona de acumulación. Esto evita el acumulamiento, que puede tener como resultado que estos atraviesen la barrera y a su vez, también impide que los residuos sigan degradándose en el agua.

Para lograr el cometido de extraer la basura del curso de agua, se precisa de dos tramos de cinta perpendiculares. El primero de ellos será el que recolecte la basura al nivel del agua y deberá posicionarse colineal a la corriente del cauce. El segundo tramo es el encargado de transportar la basura hacia afuera del cauce, por lo que debería ubicarse en forma perpendicular al sentido en el que corre el mismo.

En la actualidad ya se utilizan métodos similares a este para la captación de residuos y plantas que se encuentran a nivel superficial en diversos cursos de agua. La solución fue originalmente presentada por la empresa DESMI.¹

Aspectos técnicos de la cinta transportadora

Este sistema consta de una cinta transportadora de 1 m con una malla de acero inoxidable que permite el pasaje de agua pero es capaz de retener las partículas de micro-plástico. A continuación se coloca otra cinta transportadora de 3 m, en posición perpendicular a la anterior. Esta segunda cinta es de material plástico y continuo (sin orificios, el agua se escurre en la cinta previa). Cada cinta transportadora tiene un motor eléctrico asociado. Todo esto se coloca sobre una plataforma que se mantiene al nivel del arroyo gracias a flotadores. Finalmente es necesario un contenedor donde se puede almacenar los residuos recolectados en la superficie.

¹DESMI es una compañía danesa fundada en 1834 que se especializa en la fabricación y venta de soluciones de bombeo y equipos para el medio ambiente. Sus productos son utilizados en la industria marina, de defensa, de combustibles y servicios públicos.

Se presenta a continuación una imagen de este sistema diseñado por DESMI [DES,].



Una vez determinadas las dimensiones y los materiales, se prosigue a dimensionar los motores con ayuda del manual de Pirelli [Chuquimarca Jiménez et al., 2022]. Para lograr una extracción controlada se elige una velocidad de avance de las cintas de 0,5 m/s.

La fuerza total a realizar consta de cuatro términos como se detalla a continuación en la ecuación C.0.2.

$$F_1 = f q_c (l + l_0) \qquad F_2 = f q_m (l + l_0) \qquad (C.0.1)$$

$$F_3 = q_m H \qquad F_4 = \frac{XQ}{v} \qquad (C.0.2)$$

Donde F_1 refiere a la fuerza realizada por la cinta transportadora, F_2 a la fuerza horizontal realizada por la basura, F_3 a la fuerza vertical realizada por la basura y F_4 a la resistencia de los descargadores.

Luego, la potencia del motor queda determinada por la ecuación C.0.3.

$$P = F \cdot v \qquad (C.0.3)$$

Siendo,

f : coeficiente de fricción

Q : capacidad del transportador (ton/h)

v : velocidad de la cinta (m/s)

l : distancia entre ejes de las poleas extremas del transportador (m)

l_0 : suplemento ficticio destinado a incrementar la distancia entre ejes, $l_0 = 60 - 0,2L$

L : proyección horizontal de l (m)

q_m : peso de los residuos a transportar por unidad de longitud (kg/m)

q_c : peso de la cinta transportadora por unidad de longitud (kg/m)

H : proyección vertical de l (m)

X : parámetro dependiente del ancho de la cinta (m)

P : potencia teórica del motor (W)

F : fuerza (N)

Para la cinta transportadora metálica, se utiliza un peso por unidad de longitud de $q_c = 10 \text{ kg/m}$, un coeficiente de fricción de $f = 0,33$ (0,3 corresponde a la malla metálica y 0,03 a los cojinetes, fuente: catálogo Pirelli) y una longitud de $l = 1 \text{ m}$. Con respecto a los residuos, se estima una capacidad de recolección de $Q = 3,5 \text{ ton/h}^2$, a la velocidad mencionada, se obtiene un peso por unidad de longitud de $q_m = 1,94 \text{ kg/m}$. El parámetro X está tabulado en el catálogo de Pirelli, para un ancho estimado de 1 m $X = 0,45$.

Entonces, con las ecuaciones C.0.2 y C.0.3 se obtiene que el motor elegido para la cinta metálica debe tener al menos 1,6 HP.

C.0.1. Ventajas y desventajas de los sistemas de recolección considerados

Cinta transportadora.

Ventajas

- Gran capacidad de recolección de residuos. Aunque muy superior a lo que se estima necesario.
- Diseño modular que permite el fácil transporte de los residuos desde la superficie del agua hasta la zona designada.
- Velocidad variable.
- Sistema de recolección continuo.

Desventajas

- Requerimiento de una estructura compleja que soporte posibles inundaciones.
- Requiere sistemas de control y seguridad complejos.
- Puede presentar problemas para la recolección de objetos como botellas u otros objetos que ruedan.
- Al constar de dos tramos, casi todo el sistema se encontrará por duplicado, lo cual duplica el costo del sistema.

²Se toma este dato como referencia de la capacidad de recolección del sistema de DESMI, pero este valor se encuentra muy por encima del esperado para el arroyo Miguelete

- Requiere de un sistema adicional como pueden ser raspadores, para lograr despegar la basura que se adhiera a la cinta.
- El Funcionamiento podría verse afectado por elevaciones en el nivel del agua.
- Inversión inicial elevada.
- Alto costo de mantenimiento.
- Mayor número de componentes expuestos a vandalismo o hurto.

Sistema de jaula y brazo mecánico.

Ventajas:

- Sistema más compacto que la cinta transportadora. Ocupa menor espacio en la zona fuera del río o arroyo.
- Su funcionamiento no se ve afectado por crecidas o bajadas del nivel de agua gracias a sus flotadores.
- Diseño modular que permite el fácil transporte de los residuos desde la superficie del agua hasta la zona designada.
- No requiere de grandes estructuras para el soporte del sistema.
- Capacidad de recolección de una más amplia variedad de residuos sin presentar dificultad.
- Inversión menor respecto a la cinta transportadora dada su menor complejidad y cantidad de componentes.
- Requiere menor mantenimiento.

Desventajas

- Menor capacidad de recolección respecto del sistema de cinta transportadora.
- El sistema de recolección no es continuo.
- El diseño de la jaula queda sujeto a las dimensiones del punto de aplicación.

Apéndice D

Influencia de los plásticos sobre la fauna acuática

Se presenta una recopilación de estudios respecto la presencia de plásticos en el medio acuático y su influencia sobre la fauna.

Study	Organism	Type of Harm	Source of Debris	Effect
Allen et al. 2012	Grey seals	Entanglement	MF line, net, rope	Constriction
Beck & Barros 1991	Manatees	Entanglement	MF line, bags, other debris	Death
Campagna et al. 2007	Elephant seals	Entanglement	MF line, fishing jigs	Dermal wound
Croxall et al. 1990	Fur seals	Entanglement	Packing bands, fishing gear, other debris	Dermal wound
Dau et al. 2009	Seabirds, pinnipeds	Entanglement	Fishing gear	External wound
Fowler 1987	Fur seals	Entanglement	Trawl netting, packing bands	Death
Fowler 1987	Fur seals	Entanglement	Trawl netting, packing bands	Reduced population size
Good et al. 2010	Invertebrates, fish, seabirds, marine mammals	Entanglement	Derelict gillnets	Death
Moore et al. 2009	Seabirds, marine mammals	Entanglement	Plastic, fishing line	Death
Pham et al. 2013	Gorgonians	Entanglement	Fishing line	Damage/breakage
Velez-Rubio et al. 2013	Sea turtles	Entanglement	Fishing gear	Death
Winn et al. 2008	Whales	Entanglement	Plastic line	Dermal wound
Woodward et al. 2006	Whales	Entanglement	Plastic line	Dermal wound
Beck & Barros 1991	Manatees	Ingestion	MF line, bags, other debris	Death
Bjorndal et al. 1994	Sea turtles	Ingestion	MF line, fish hooks, other debris	Intestinal blockage, death
Brandao et al. 2011	Penguins	Ingestion	Plastic, fishing gear, other debris	Perforated gut, death
Browne et al. 2013	Lugworms (laboratory)	Ingestion	Microplastics	Biochemical/cellular, death
Bugoni et al. 2001	Sea turtles	Ingestion	Plastic bags, ropes	Gut obstruction, death
Carey 2011	Seabirds	Ingestion	Plastic particles, pellets	Perforated gut
Cedervall et al. 2012	Fish (laboratory)	Ingestion	Nanoparticles	Biochemical/cellular
Connors & Smith 1982	Seabirds	Ingestion	Plastic pellets, foam	Biochemical/cellular
Dau et al. 2009	Seabirds, pinnipeds	Ingestion	Fishing hooks	Internal wound
de Stephanis et al. 2013	Sperm whale	Ingestion	Identifiable litter items	Gastric rupture, death
Fry et al. 1987	Seabirds	Ingestion	Plastic fragments, pellets, identifiable litter	Gut impaction, ulcerative lesions

Study	Organism	Type of Harm	Source of Debris	Effect
Jacobsen et al. 2010	Sperm whales	Ingestion	Fishing gear, other	Gastric rupture, gut impaction, death
Lee et al. 2013	Copepods (laboratory)	Ingestion	Micro- and nanoplastics	Death
Oliveira et al. 2013	Fish (laboratory)	Ingestion	Microplastics	Biochemical/cellular
Rochman et al. 2013a-c	Fish (laboratory)	Ingestion	Microplastics	Biochemical/cellular
Ryan 1988	Birds (laboratory)	Ingestion	Microplastics	Reduced organ size
Velez-Rubio et al. 2013	Sea turtles	Ingestion	Marine debris	Gut obstruction
Wright et al. 2013	Lugworms (laboratory)	Ingestion	Microplastics	Biochemical/cellular
Von Moos et al. 2012	Mussels (laboratory)	Ingestion and gill uptake	Microplastics	Biochemical/cellular
Katsanevakis et al. 2007	Epibenthic megafauna	Interaction (contact)	Plastic bottles, glass jars	Altered assemblage
Lewis et al. 2009	Sessile invertebrates	Interaction (contact)	Lobster traps	Altered assemblage
Uneputtu & Evans 1997	Assemblage on sediment	Interaction (contact)	Plastic litter	Altered assemblage
Chiappone et al. 2002	Sessile invertebrates	Interaction (contact)	MF line, lobster trap, hook and line gear	Tissue abrasion
Chiappone et al. 2005	Sessile invertebrates	Interaction (contact)	Hook and line gear	Tissue abrasion
Uhrin & Schellinger 2011	Seagrass	Interaction (contact)	Crab pots, tires, wood	Breakage, suffocation, death
Ozdilek et al. 2006	Sea turtles	Interaction (obstruction)	Waste, medical waste	Reduced population size
Widmer & Hennemann 2010	Ghost crabs	Interaction (obstruction)	Beach litter, mostly plastic	Reduced population size
Widmer & Hennemann 2010	Ghost crabs	Interaction (substrate)	Beach litter, mostly plastic	Altered assemblage
Goldstein et al. 2012	Marine insects	Interaction (substrate)	Microplastics	Increased population size

Figura D.1: Resumen de estudios y artículos respecto a la influencia generada por la presencia de plásticos en el medio acuático en distintas especies animales. Fuente: [Law, 2017].

Apéndice E

Código de cálculo de caudal en Octave

```
1 clear all
2 clear all
3 L = 0.03 # Distancia entre orificios del tubo en metros VALOR FIJO
4 D = 0.0508 # Diámetro del tubo
5 d = 0.001 # Diámetro de orificios (1mm) VALOR FIJO
6 At=D^2*pi/4 # Area de pasaje del tubo
7 A_o = d^2*pi/4 # Area de pasaje del orificio
8 Nor = 940 # Número de orificios en tubo
9 P1 = 15000 # Presión a la entrada del tubo en Pa
10 rho = 1000 # Densidad del agua en kg/m^3
11 rhoa1 = (101325+P1)/101325*1.2 # Densidad de entrada al tubo (a P1) en kg/m^3
12 nu = 1.5e-5 # Viscosidad cinemática del aire en m^2/s
13 Cd = 0.26 # Coeficiente de descarga de los orificios
14 Y=0.97 # Coeficiente de compresibilidad aprox
15 beta = d/D # Coeficiente beta para formula de descarga orificio
16 h = 0.5 # altura del tirante de agua en m
17 P_a = rho*9.8*h # Presión del agua sobre el tubo en Pa
18 Qenti = 0.0018*Nor/73*rhoa1/1.2 # Caudal que entrega el compresor en condiciones normales, primer
    iteración en m^3/s
19 Qtot=0
20 tol=0.000001 # tolerancia
21 k=0
22
23 while (abs(Qenti-Qtot)>=tol)
24 k=k+1
25 for i=1:Nor
26
27 if i==1
28     Q(i)=Cd*Y*(A_o)*(2*(P1-P_a)/(rhoa1*(1-(beta)^4)))^0.5;
29     Qt(i)=Qenti*1.2/rhoa1-sum(Q(1:i));
30     QN(i)=rhoa1/1.2*Q(i); # Caudal por orificio en condiciones normales m^3/s
31     vt(i)=Qt(i)/At;
32     Re(i)=vt(i)*D/nu;
33     if Re(i)>=5000
34         f(i) = 0.0032+0.21*Re(i)^(-0.237);
35     elseif
```

```

36     f(i)=64/Re(i);
37     endif
38     P(i)=P1;
39     rhoa(i) = (101325+P1)/101325*1.2;
40     elseif
41
42     Q(i)=Cd*Y*(A_o)*(2*(P(i-1)-P_a)/(rhoa(i-1)*(1-(beta)^4)))^0.5; # Caudal por orificio i m^3/s
43     Qt(i)=Qenti*1.2/rhoa1-sum(Q(1:i)); # Caudal por tubo en i en m^3/s
44     QN(i)=rhoa(i-1)/1.2*Q(i); # Caudal por orificio en condiciones normales m^3/s
45     vt(i)=Qt(i)/At; # Velocidad por tubo en i en m/s
46     Re(i)=vt(i)*D/nu;
47     if Re(i)>=5000
48     f(i) = 0.0032+0.21*Re(i)^(-0.237);
49     elseif
50     f(i)=64/Re(i);
51     endif
52     rhoa(i) = (101325+P(i-1))/101325*1.2;
53     P(i)=P(i-1)-f(i)*L/D*vt(i)^2/(2)*rhoa(i-1);# Presion en tubo em i en Pa
54 endif
55
56 endfor
57 Qtot=sum(QN) # Caudal que entrega el compresor en condiciones normales Nm^3/s
58 Qenti=(Qtot+Qenti)/2
59 clear Pf Qtf QNf Qf vf Ref;
60 Pf=P;
61 Qf=Q;
62 QNf=QN;
63 vf=vt;
64 Ref=Re;
65 Qtf=Qt;
66 Pfinal=P(940);
67
68 subplot(3,1,1)
69
70 plot([1:1:940],Pf)
71 title("P(i) en tubo (Pa)")
72 subplot(3,1,2)
73
74 plot([1:1:940],Qtf)
75 title("Q en tubo en condicion P(i) (m3/s)")
76 subplot(3,1,3)
77
78 plot([1:1:940],Qf)
79 title("Q en orificio en condicion P(i) (m3/s)")
80 clear Q Qt QN Re f P rhoa vt
81
82 endwhile

```

Apéndice F

Modelo formación y desarrollo de una burbuja

A continuación se presenta un resumen del modelo descrito por Kumar en su ensayo [Ramakrishnan et al., 1969]. Se realiza un modelo aproximado, que se describe en dos etapas, donde cada una de estas se rige por un balance de fuerzas distinto.

La **primer etapa** finaliza cuando se igualan las fuerzas en sentidos opuestos (ver figura F.1). Estas son:

$$F_B = V(\rho_L - \rho_G)g \quad (\text{F.0.1})$$

$$F_D = 6\pi\mu v_e r_e \quad (\text{F.0.2})$$

$$F_T = \pi D\gamma \cos\theta \quad (\text{F.0.3})$$

$$F_i = Q^2(\rho_G + \frac{11}{16}\rho_L) \frac{V^{-0,66}}{12} \pi (\frac{3}{4\pi^{0,66}}) \quad (\text{F.0.4})$$

Donde, F_B es la fuerza de empuje, F_D la fuerza de drag, F_T la tensión superficial, F_i la fuerza de inercia, V el volumen de la burbuja al finalizar la primer etapa, ρ_L y ρ_G la densidad del líquido y del gas respectivamente, g la aceleración gravitatoria, μ la viscosidad dinámica, γ la velocidad de cizallamiento, θ el ángulo de contacto burbuja-superficie y el subíndice e refiere al instante final de la primer etapa.

Se define la masa virtual de la burbuja como $M = (\frac{11}{16}\rho_L Q t_e)$.

Se asume que la velocidad de ascenso de la burbuja es igual a la variación de su tamaño, y por ende de su radio. Esto es:

$$v_e = \left(\frac{dr_e}{dt_e} = \frac{Q}{4\pi r_e^2} \right) \quad (\text{F.0.5})$$

Realizando un balance de fuerzas y definiendo $V = V_E$ en el instante final de la primer etapa, se tiene:

$$V_E^{5/3} = \frac{11}{192\pi(3/4\pi)^{2/3}g}Q^2 + \frac{3}{2(3/4\pi)^{1/3}g} \times \frac{\mu}{\rho_1}QV_E^{1/3} + \frac{\pi D\sigma}{g\rho_1}V_E^{2/3} \quad (\text{F.0.6})$$

La **segunda etapa** consiste en el desprendimiento de la burbuja. Dado que las fuerzas ascendentes vencen a las descendentes, la burbuja se acelera. Se considera que esta se desprende cuando recorre una distancia igual al radio de la burbuja en la situación previa (balance de fuerzas).

El movimiento de la burbuja puede describirse mediante la Segunda Ley de Newton de la siguiente manera:

$$M \frac{dv'}{dt} + v' \frac{dM}{dt} = (V_E + Q_t)\rho_L g - 6\pi\mu r(v + v_e) - \frac{Q_t^2(11/16\rho_L)}{12\pi[3(V_E + Q_t)/4\pi]^{2/3}} - \pi D\gamma \cos \theta \quad (\text{F.0.7})$$

Donde v' es la velocidad central de la burbuja: $v' = v + (dr/dt)$.

Considerando la formación de la burbuja a caudal de aire constante, el modelo puede generalizarse resultando el siguiente balance de fuerzas:

$$V_t(\rho_L - \rho_G)g = \frac{(\rho_G + 11/16\rho_L)}{12\pi(3/4\pi)^{2/3}V_t^{2/3}}[3V_t \frac{dQ_t}{dt_e} + Q_t^2] + \pi D\gamma \cos \theta + 3\mu \frac{Q_t}{2(3/4)^{0,33}V_t^{1/3}} \quad (\text{F.0.8})$$

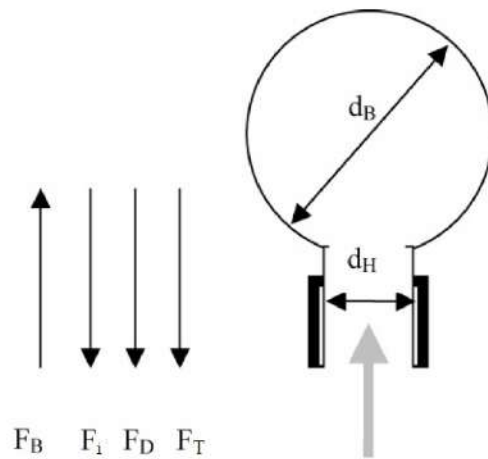


Figura F.1: Balance de fuerzas en la formación de una burbuja. Imagen extraída y modificada de [Kulkarni and Joshi, 2005].

Apéndice G

Compresores

En esta sección se explica en este motivo distintas causas por las que se descartaron algunos de los equipos evaluados.

Los compresores recíprocos o de desplazamiento positivo, fueron descartados debido a que estos equipos se caracterizan por entregar caudales bajos pero ser capaces de elevar la presión en gran medida, funcionamiento opuesto al necesario para esta aplicación. Respecto a los compresores de lóbulos o de tornillo se evaluaron 4 equipos. Los compresores de tornillo presentan un primer problema y es que, para los equipos evaluados, por motivos de lubricación deben trabajar a una presión mínima de 5bar, presión muy elevada en comparación a las necesarias. Por este motivo, estos equipos utilizarían mayor energía que la necesaria, esto representa un mayor consumo energético que es uno de los puntos tenidos en cuenta la hora de seleccionar el compresor.

Marca	Modelo	Tipo	P mínima (barg)	Tanque	Sistema de control	Sistema de regulación	Consumo (kW)
ATLAS COPCO	ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6 Y	Lóbulos	0,30	No	PLC	Variación de velocidad	1,3
OMEL	SR-0710	Lobulos	0,30	No	PLC	Variación de velocidad	1,9
SCHULZ	SRP4015 R	Tornillo	5,00	500 lt	PLC	-	11,0
SCHULZ	SRP4015 R Flex	Tornillo	5,00	500 lt	PLC	Variación de velocidad	11,0

Figura G.1: Comparación compresores: características generales.

Marca	Modelo	kWh mensuales	Tarifa (\$/kWh)	Costo energético		Costo total equipo		Costo total equipo	
				1 año (\$)	1 año (USD)	Inversión (USD)	a 5 años (USD)	Inversión (USD)	a 5 años (USD)
ATLAS COPCO	ZL1 VSD 2 H 300 mbar DI6 Y	936	5,579	62663	1607	15000	23034	15000	130169
OMEL	SR-0710	1368	6,402	105095	2695	10875	24349	10875	132619
SCHULZ	SRP4015 R	7920	6,402	608446	15601	6422	84428	6422	428562
SCHULZ	SRP4015 R Flex	7920	6,402	608446	15601	14622	92628	14622	477762

Figura G.2: Comparación compresores: costo.

Apéndice H

Selección de columna

En esta sección se muestra en forma de tabla el proceso iterativo de cálculo para la selección del tubo correcto que mejor ajustara a las solicitaciones del sistema.

Schedule	D_exterior (mm)	D_interior (mm)	Momento de inercia tubo (m ⁴)	Evaluación del cortante máximo			Evaluación de la fuerza crítica de pandeo				
				Cortante máximo	Verificación	Índice de esbeltez	Esfuerzo dir + flec (MPa)	F dir + flec (kN)	Esf crítica (Pa)	Verificación	
#3000	36	16	7,92E-08	5,36E+08	No	111	1.071	875	4.684	No	
#1332	40	20	1,18E-07	4,01E+08	No	100	801	755	6.965	No	
#2670	40	25	1,06E-07	4,43E+08	No	100	887	679	6.295	No	
#1336	43	30	1,28E-07	3,97E+08	No	93	793	591	7.570	No	
#1341	45	27	1,75E-07	3,03E+08	No	89	607	617	10.357	No	
#1355	45	28	1,71E-07	3,11E+08	No	89	621	605	10.116	No	
#1334	50	25	2,88E-07	2,05E+08	Si	80	411	605	17.003	No	
#1353	50	32	2,55E-07	2,31E+08	Si	80	463	536	15.094	No	
#2155	57	27	4,92E-07	1,37E+06	Si	70	274	542	29.090	No	
#1340	57	39	4,05E-07	1,67E+08	Si	70	333	452	23.919	No	
#1339	60	27	6,10E-07	1,16E+08	Si	67	232	524	36.066	No	
#6090	63	32	7,22E-07	1,03E+08	Si	63	206	477	42.670	No	
#1653	63	40	6,48E-07	1,15E+08	Si	63	230	428	38.284	No	
#6091	70	45	9,77E-07	8,48E+07	Si	57	170	383	57.775	No	
#1350	71	36	1,16E-06	7,21E+07	Si	56	144	424	68.868	No	
#2669	75	50	1,25E-06	7,13E+07	Si	53	143	350	73.681	No	
#2426	81	47	1,87E-06	5,12E+07	Si	49	102	350	110.756	No	
#1345	81,5	42	2,01E-06	4,80E+07	Si	49	96	367	119.000	No	
#1351	83	64	1,51E-06	6,54E+07	Si	48	131	287	89.033	No	
#1347	86	51	2,35E-06	4,33E+07	Si	47	87	326	139.104	No	
#2156	90	45	3,02E-06	3,53E+07	Si	44	71	337	178.493	No	
#1353	90	60	2,58E-06	4,13E+07	Si	44	83	292	152.784	No	
#1354	91	51	3,03E-06	3,56E+07	Si	44	71	317	179.365	No	
#2105	95	70	2,82E-06	4,00E+07	Si	42	80	259	166.686	No	
#1355	101	70	3,93E-06	3,05E+07	Si	40	61	254	232.297	No	
#1356	101	75	3,55E-06	3,38E+07	Si	40	68	243	210.154	No	
#1369	102	67	4,32E-06	2,80E+07	Si	39	56	260	255.633	No	
#1361	102	75	3,76E-06	3,23E+07	Si	39	65	242	222.292	No	
#2020	108	58	6,12E-06	2,09E+07	Si	37	42	273	1,62E+05	Si	
#1363	108	78	4,86E-06	2,64E+07	Si	37	53	232	287.385	Si	
#2402	109	78	5,11E-06	2,54E+07	Si	37	51	231	302.211	Si	
#1362	110	78	5,37E-06	2,44E+07	Si	36	49	230	317.451	Si	
#1366	113	88	5,06E-06	2,66E+07	Si	35	53	210	299.120	Si	
#2461	114	58	7,74E-06	1,75E+07	Si	35	35	265	457.277	Si	
#2040	114	74	6,82E-06	1,99E+07	Si	35	40	235	403.099	Si	
#2403	114	82	6,07E-06	2,24E+07	Si	35	45	220	358.916	Si	
#1367	115	60	7,95E-06	1,72E+07	Si	35	34	260	469.933	Si	
#2485	115	79	6,67E-06	2,05E+07	Si	35	41	225	394.513	Si	
#2071	118	90	6,30E-06	2,23E+07	Si	34	45	204	372.218	Si	

Figura H.1: Tabla de selección de columna.

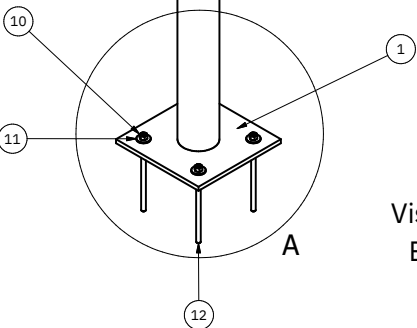
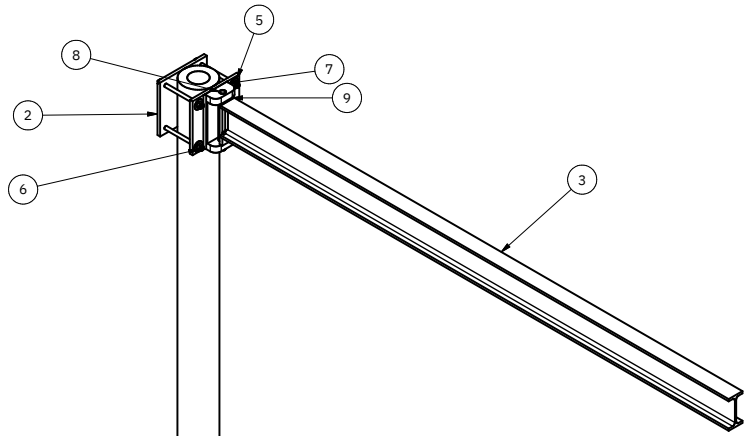
Se presenta a continuación la planilla de cálculo del método de Sulzberger.

DATOS			
Peso específico del suelo	γ_s	kg/m ³	1700
Peso específico del Hormigón	γ_H°	kg/m ³	2300
Ángulo de tierra gravante (suelo no movido)	β	°	6
Fricción suelo - hormigón	μ		0,4
Índice de compresibilidad horizontal = $C_b/1,20$	C_{t2m}	kg/cm ³	2
Índice de compresibilidad horizontal a profundidad t	C_{tt}	kg/cm ³	1
Índices de compresibilidad vertical	C_b 2m	kg/cm ³	2
Índice de compresibilidad vertical a profundidad t	C_{bt}	kg/cm ³	1
GEOMETRÍA DE FUNDACIÓN			
Largo de Fundación	a	cm	100
Ancho de Fundación	b	cm	100
Profundidad de Fundación	t	cm	100
Empotramiento de poste en fundación	e	cm	0
Sobre elevación de Fundación	s	cm	0
Ancho de cuenco	D	cm	0
Cantidad de noyos	n		0
Volumen de Hormigón	VH°	m ³	1
Peso de macizo	PH°	kg	2300
Volumen de Suelo gravante	VS	m ³	0,22
Peso de Suelo gravante	PS	kg	382
Acción vertical (incluye peso de equipo)	Pe	kg	475
SOLICITACIONES			
Corte reducido a nivel superior de fundación	Q	kg	0
Momento reducido a nivel superior de fundación	M	kgm	464
Momento reducido a centro de giro	Mg	kgm	464
Peso total= Pe +PS + PH	Pt	kg	3157
MOMENTO RESISTENTE			
	$\tan(\alpha_1)$		0,0076
Momento lateral	M_s	kgm	278
	$\tan(\alpha_2)$		0,0063
Momento base	M_b	kgm	745
Momento resistente = $M_s + M_b$	M_r	kgm	1023
	M_s/M_b		0,4
	s		1,2
Factor de seguridad	FS		1,84
Factor de seguridad mínimo recomendado	FS min		1
Cumple			SI
TENSIONES VERTICALES			
Tensión vertical		kg/cm ²	0,28
Tensión admisible suelo		kg/cm ²	1
Cumple			SI

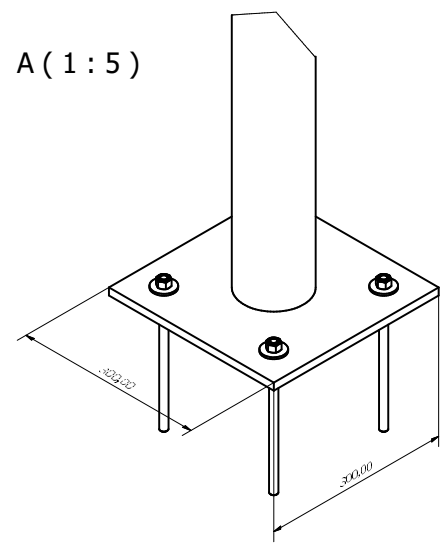
Figura H.2: Planilla de cálculo del método de Sulzberguer.

Apéndice I

Planos

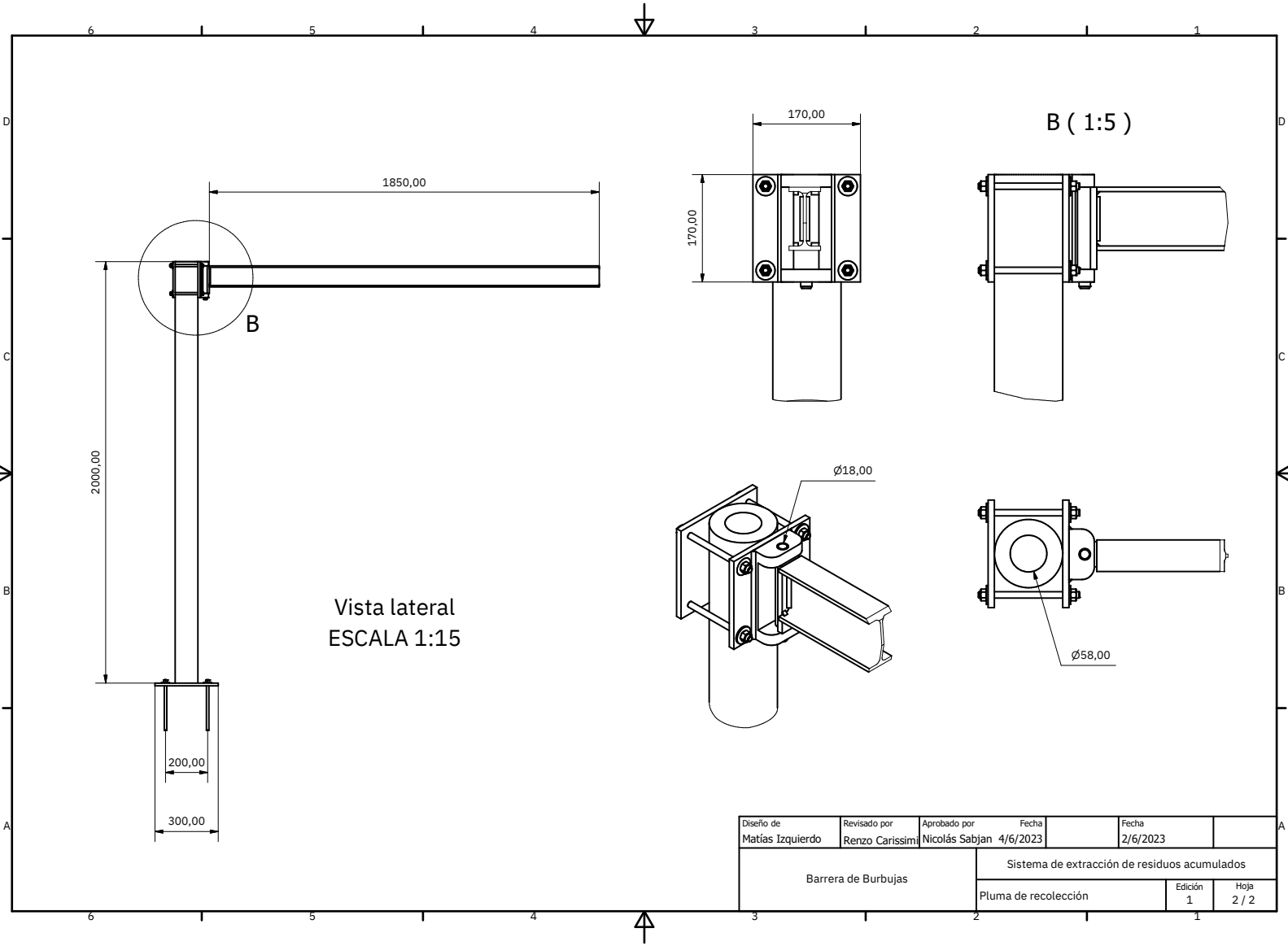


Vista isométrica
ESCALA 1:10



A (1:5)

LISTA DE PIEZAS					
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN		
1	1	Columna	Tubo de hierro 2 m - 108x58 mm		
2	2	Placa	Acero inox AISI 304		
3	1	JIS G 3192 - 100 x 50 x 5 - 1850	Forma de I		
4	4	DIN 976-1 - M10 x 160 - B	Pernos prisioneros -- Parte 1: rosca métrica		
5	8	ISO 7093 C - ST 10 - 100 HV	Arandelas planas - Serie grande - Productos de clase C		
6	8	ISO 4034 - M10	Tuercas hexagonales - Productos de clase C		
7	1	Articulacion exterior			
8	1	ISO 2340 - A - 18 x 180	Ejes de articulaci3n sin cabeza A		
9	1	Articulacion interior			
10	4	ISO 4034 - M12	Tuercas hexagonales - Productos de clase C		
11	4	ISO 7093 C - ST 12 - 100 HV	Arandelas planas - Serie grande - Productos de clase C		
12	4	DIN 976-1 - M12 x 240 - B	Pernos prisioneros -- Parte 1: rosca métrica		
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Matías Izquierdo	Renzo Carissimi	Nicolás Sabjan	4/6/2023	2/6/2023	
Barrera de Burbujas			Sistema de extracci3n de residuos acumulados		
			Pluma de recolecci3n	Edici3n	Hoja
				1	1 / 2



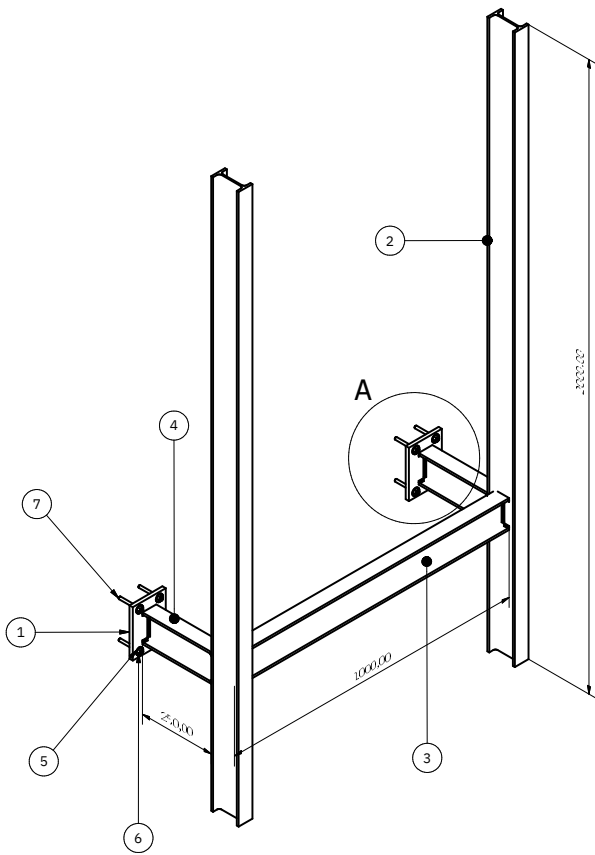
Vista lateral
ESCALA 1:15

B (1:5)

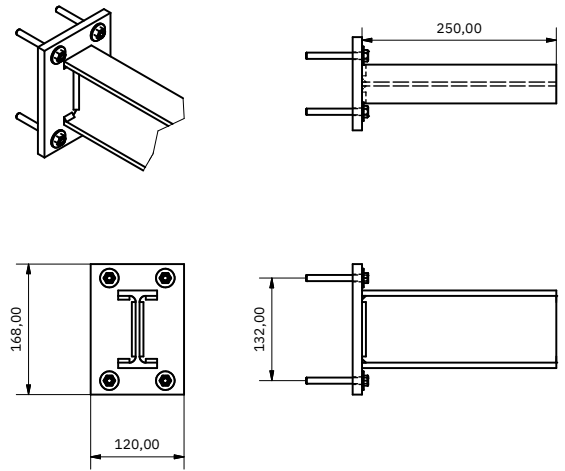
Diseño de Matías Izquierdo	Revisado por Renzo Carissimi	Aprobado por Nicolás Sabjan	Fecha 4/6/2023	Fecha 2/6/2023	
Barrera de Burbujas			Sistema de extracción de residuos acumulados		
			Pluma de recolección	Edición 1	Hoja 2 / 2

NOTAS:

1. El material de los elementos presentados es acero inoxidable calidad AISI 304



A (1 : 5)



LISTA DE PIEZAS				
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	
1	1	Placa de anclaje	Placa de acero inoxidable	
2	2	JIS G 3192 - 100 x 50 x 5 - 2000 mm	Forma de I	
3	1	JIS G 3192 - 100 x 50 x 5 - 1000 mm	Forma de I	
4	2	JIS G 3192 - 100 x 50 x 5 - 250 mm	Forma de I	
5	8	ISO 7093 C - ST 8 - 100 HV	Arandelas planas - Serie grande - Productos de clase C	
6	8	ISO 4034 - M8	Tuercas hexagonales - Productos de clase C	
7	8	DIN 976-1 - M8 x 80 - B	Pernos prisioneros - Parte 1: rosca métrica	
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
Matías Izquierdo	Nicolás Sabjan	Renzo Carissimi	4/6/2023	2/6/2023
Barrera de Burbujas			Sistema de anclaje a la margen del curso	
			Anclaje de jaula de recolección	Edición Hoja 1 / 1

Apéndice J

Eléctrica

Se presenta a continuación una sección con los cálculos de las corrientes de cortocircuitos para los distintos puntos de la instalación. No se consideran las impedancias en los cables de manera de permanecer del lado seguro al calcular corrientes de cortocircuito que serían mayores a las reales.

Se considera la siguiente tabla para la corriente de cortocircuito de la red, teniendo en cuenta que el cable de acometida proveído por UTE es de 6 mm^2 de sección y tiene recubrimiento XLPE.

SECCIÓN NOMINAL mm ²	DURACIÓN DEL CORTOCIRCUITO EN SEGUNDOS (t)			
	0,1	0,2	0,3	0,5
1,5	678	480	392	303
2,5	1131	799	653	506
4	1809	1279	1044	809
6	2713	1919	1566	1213
10	4522	3198	2611	2022

Cuadro J.1: Corrientes cortocircuito CC Aislamiento XLPE.

Se adjunta una foto de los cálculos de las corrientes de cortocircuito.

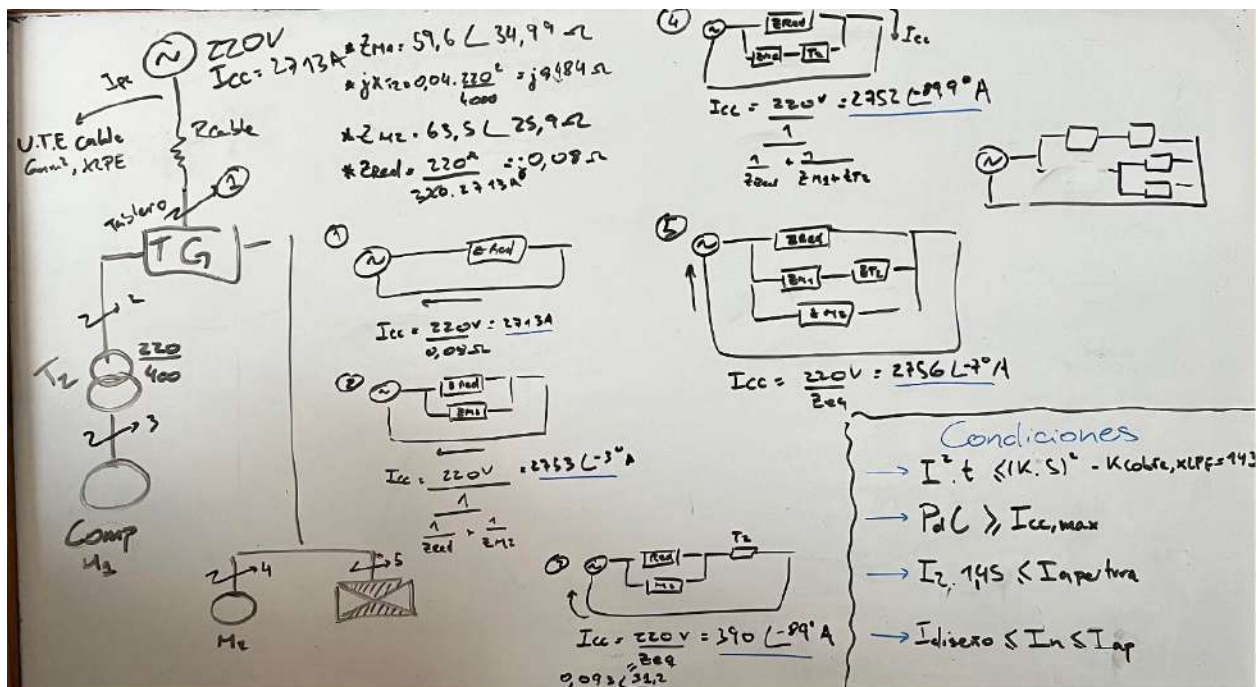


Figura J.1: Cálculos de las corrientes de cortocircuitos.

En la siguiente tabla se encuentra el poder de corte y clase de limitaciones de energía.

Poder de corte asignado	Clases de limitaciones de energía				
	1	2		3	
	$I^2 \cdot t$ máx. (A ² s)	$I^2 \cdot t$ máx. (A ² s)		$I^2 \cdot t$ máx. (A ² s)	
	Tipos B y C	Tipo B	Tipo C	Tipo B	Tipo C
3000	Sin límite especificado	40.000	50.000	18.000	22.000
4500		80.000	100.000	32.000	39.000
6000		130.000	160.000	45.000	55.000
10.000		310.000	370.000	90.000	110.000

Cuadro J.2: Poder de corte y Clase de limitaciones de energía.

Se muestra en la siguiente tabla las clases de limitaciones de energía según el PdC.

Poder de corte asignado	Clases de limitaciones de energía					
	1	2		3		
	I ² · t máx. (A ² s)	I ² · t máx. (A ² s)		I ² · t máx. (A ² s)		
	Tipos B y C		Tipo B	Tipo C	Tipo B	Tipo C
3000	Sin límite especificado	40.000	50.000	18.000	22.000	
4500		80.000	100.000	32.000	39.000	
6000		130.000	160.000	45.000	55.000	
10.000		310.000	370.000	90.000	110.000	

Cuadro J.3: Poder de corte y Clase de limitaciones de energía.

Considerando llaves de clase 3 y tipo C, se presentan debajo los puntos calculados.

Punto CC 1

$$I_{CC} = 2713 \text{ A} \quad (\text{J.0.1})$$

$$I_{Diseno} = 7,0 \text{ A} \quad (\text{J.0.2})$$

Seleccionando una llave con $P_{dC} = 6000 \text{ A}$ de clase 3 tipo C, la sección de los cables debe ser mayor o igual a 2 mm. Como el cable desde la IPC al tablero general es proporcionado por UTE y tiene una sección de 6 mm y cunente con un recubrimiento de XLPE. Para dicho cable, según la tabla XI del Reglamento de baja tensión de UTE [UTE, a], la corriente máxima admisible es de 50A. Siguiendo los criterios de selección mencionados en la sección de Dimensionado Eléctrico 7.2.6, se elige una llave con corriente de apertura de 25A. Se selecciona la llave A9K17625 del catálogo de Schneider.

Punto CC 2

$$I_{CC} = 2713 \text{ A} \quad (\text{J.0.3})$$

$$I_{Diseno} = 3,7 \text{ A} \quad (\text{J.0.4})$$

Punto CC 3

$$I_{CC} = 390 \text{ A} \quad (\text{J.0.5})$$

$$I_{Diseno} = 3,7 \text{ A} \quad (\text{J.0.6})$$

Punto CC 4

$$I_{CC} = 2752 \text{ A} \quad (\text{J.0.7})$$

$$I_{Diseno} = 3,6 \text{ A} \quad (\text{J.0.8})$$

Punto 5

$$I_{CC} = 2756 \text{ A} \quad (\text{J.0.9})$$

$$I_{Diseno} = 0,65 \text{ A} \quad (\text{J.0.10})$$

Para todos los puntos se selecciona la llave Schneider Electric A9K17616 (Acti9 iK60 - Interruptor magnetotérmico - 1P+N - 16A - Curva C - 6kA) y un cable de sección de 2 mm². Con la selección de esta llave se cumplen con todas las restricciones planteadas.

Debajo se presentan las cuentas para la verificación por caída de tensión y corriente admisible para los cables seleccionados.

Motor compresor (trifásico)		Aparejo eléctrico (monofásico)		Iluminación (monofásico)		Transformador 220/400V	
cos(φ)	0,82	cos(φ)	0,9	cos(φ)	1	Re(z0)	0 Ohm
P _{eléctrica}	2,2 kW	P _{eléctrica}	0,75 kW	P _{eléctrica}	82 W	Im(z0)	0 Ohm
Rendimiento	86,50%					Fi(z0)	0 °
S	2,68 kVA					Re(zcc)	1,00E-19 Ohm
Factor de ampliación	1,2					Im(zcc)	1,6 Ohm
S con Famp	3,2 kVA					Fi(zcc)	90 °
Nivel de tensión	400 V	Nivel de tensión	230 V	Nivel de tensión	230 V	ucc	4%
Z _{motor}	59,6 Ohm	Z _{aparejo}	63,5 Ohm	R	348,6 Ohm	Sn	4 kVA
Re(Z _{motor})	48,9 Ohm	Re(Z _{aparejo})	57,1 Ohm			U _{secundario}	400 V
Im(Z _{motor})	34,1 Ohm	Im(Z _{aparejo})	27,7 Ohm				
i _{nominal motor @ 400V}	3,87 A	i _{nominal aparejo @ 230V}	3,62 A				
Línea 1		Línea 3					
Fi(i)	-36,12 °	Fi(i)	-24 °				
I	3,81 A	I	4,15 A				
FS, Motores solos	1,25	I (Con FS para i motor)	5,03 A				
I (Con FS)	4,76 A	Largo cable 3	92 m				
Re(i)	3,85	Sección cable 3	2 mm ²				
Im(i)	-2,81	Z cable 3	0,7886 Ohm				
Auxiliar: Re(i*(Z _{c1} +Z _{cc} +Z _{c2}))	4,754209274	Caída de tensión (<2%)	1,72%				
Auxiliar: Im(i*(Z _{c1} +Z _{cc} +Z _{c2}))	6,092899362	Línea 4		Línea 5			
Re(400/raiz(3)-Auxiliar)	225,1858984	Tensión en nodo A	226,1 V	Tensión en nodo A	226,1 V		
Im(400/raiz(3)-Auxiliar)	-6,092899362	Re(V _A)	226,1	Re(V _A)	226,1		
Largo cable 1	4 m	Im(V _A)	1,5	Im(V _A)	1,5		
Largo cable 2	4 m	Fi(i)	-28 °	Fi(i)	-0,0066 °		
Sección cable 1	2 mm ²	I	3,56 A	I	0,65 A		
Sección cable 2	2 mm ²	Re(i)	3,14	Re(i)	0,65		
Z cable 1	0,0342 Ohm	Im(i)	-1,67	Im(i)	-0,0000791		
Z cable 2	0,0342 Ohm	Auxiliar: Re(i*(Z _{c4}))	0,107501404	Auxiliar: Re(i*(Z _{c5}))	0,022182241		
Tensión en motor (U)	391,9 V	Auxiliar: Im(i*(Z _{c4}))	-0,05715951	Auxiliar: Im(i*(Z _{c5}))	-2,57E-06		
Caída de tensión (<5%)	2,02%	Re(V _{aparejo})	226	Re(V _{iluminación})	226,1		
		Im(V _{aparejo})	1,6	Im(V _{iluminación})	1,5		
		Largo cable 4	4 m	Largo cable 5	4 m		
		Sección cable 4	2 mm ²	Sección cable 5	2 mm ²		
		Z cable 4	0,0342 Ohm	Z cable 5	0,0342 Ohm		
		Tensión en bornes de aparejo (V)	226 V	Tensión en bornes de iluminación (V)	226,1 V		
		Caída de tensión (<3%)	0,05%	Caída de tensión (<1%)	0,01%		

Cuadro J.4: Verificación sección cables por caída de tensión y corriente admisible.

Para la protección contra contactos directos se selecciona una llave diferencial de alta sensibilidad de 30 mA de curva tipo C1 como recomienda el Reglamento de Baja Tensión (RBT) de UTE [UTE, a]. A continuación se adjunta una figura con las curvas tiempo corriente:

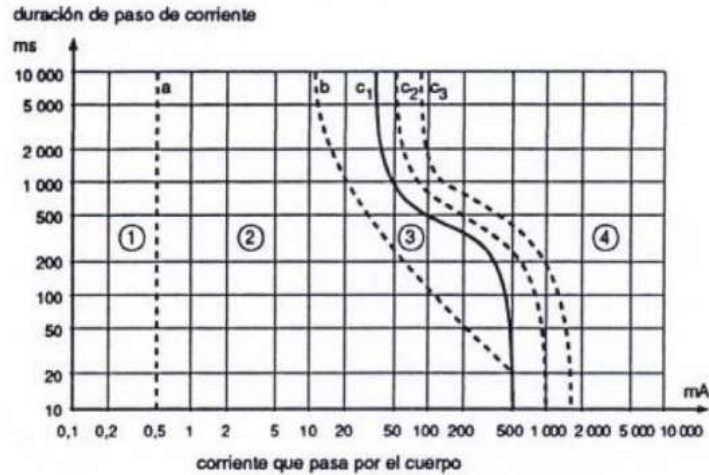


Figura J.2: Zonas tiempo-corriente para corrientes alternas (15 a 100Hz)

El cable a tierra se selecciona según el criterio de la siguiente tabla extraída de las notas [Facultad de Ingeniería, 2021].

Sección de los conductores de fase de la instalación S (mm^2)	Sección mínima de los conductores de protección S_{PE} (mm^2)
	Si el conductor de protección es del mismo material que el conductor de fase
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Cuadro J.5: Sección de conductor de cable a tierra

Dado que los cables de fase de la instalación son menores a 16 mm^2 , resulta que el conductor de protección será de la misma sección que el cable de fase (2 mm^2).

Respecto de la configuración de puesta a tierra se propone una configuración de jabalinas enterradas, con una resistencia menor a 5 ohm , también siguiendo las recomendaciones del RBT de UTE [UTE, a].

Apéndice K

Alternativas de control

En caso de que una presión de 300 mbar no fuera suficiente para lograr una buena retención en las condiciones mas exigentes del arroyo, lo cual debe evaluarse mediante pruebas *in situ*, se plantea la segunda alternativa, que consiste en un sistema para elevar la presión de suministro por encima de los 300 mbar.

Como se menciona en el párrafo anterior, esto debería ser evaluado de manera de lograr determinar si este aumento de presión supone una mejora en cuanto al porcentaje de retención de residuos. Con este objetivo se propone instalar un tanque de acumulación con una válvula de alivio ON-OFF que libere a la atmósfera, actuada mediante una señal eléctrica proveniente de un transductor de presión. De este modo, si se regula la velocidad de giro del compresor para entregar un caudal superior al requerido por la barrera, mientras la válvula de alivio se encuentra cerrada la presión del tanque aumentará. Este sistema funciona configurando una presión de apertura y cierre de la válvula de alivio: cuando esta llega al valor de presión superior, la válvula abre reduciendo la presión del tanque y, cuando llega al valor de presión inferior, la válvula cierra volviendo a aumentar la presión interna a medida que sigue entrando aire.

A continuación, en la figura ?? se presenta un diagrama PID del sistema alternativo propuesto.

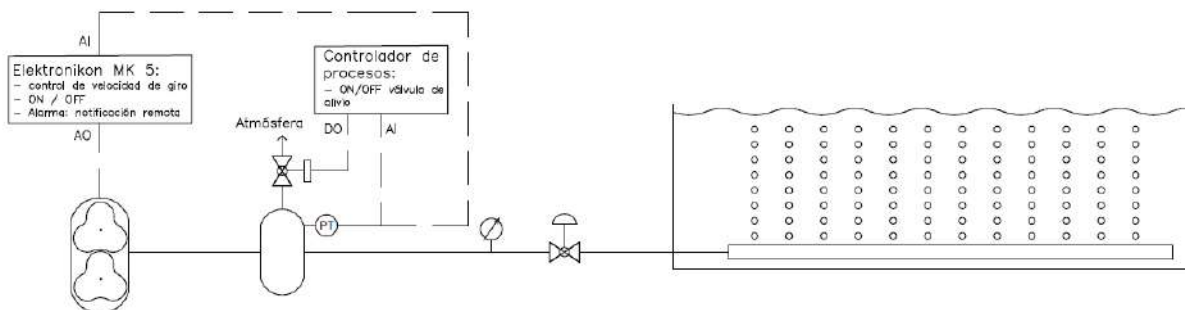


Figura K.1: Diagrama PID del sistema BdB con el método de regulación alternativo.

Para realizar la selección de los equipos mencionados, es necesario realizar un balance de masa al interior del tanque de acumulación:

$$\frac{\Delta m}{\Delta T_{cerrada}} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (K.0.1)$$

Mientras la válvula de alivio permanece cerrada, el balance de masa deriva en:

$$\frac{V(\rho(P_1) - \rho(P_2))}{\Delta T_{cerrada}} = \rho(P_{atm})(Q_{comp} - Q_{tubo}) \quad (K.0.2)$$

Mientras permanece abierta:

$$\frac{V(\rho(P_1) - \rho(P_2))}{\Delta T_{abierta}} = \rho(P_{atm})(Q_{comp} - Q_{tubo} - Q_{valv}) \quad (K.0.3)$$

Donde m es la masa de aire, T el tiempo que la válvula permanece abierta o cerrada, V el volumen del tanque, ρ la densidad del aire, P la presión, Q_{comp} , Q_{tubo} y Q_{valv} el caudal que entrega el compresor, el que demanda el tubo y el que libera la válvula respectivamente.

Se destaca que esta alternativa, al ser la que posee un mayor número de componentes y requerir que el sistema trabaje con velocidades mayores, es también la configuración que tiene un costo más elevado para su implementación y a su vez un mayor consumo energético.

Como última alternativa se plantea evaluar el rendimiento de la barrera si se realiza un acople directo al compresor y por lo tanto, se opera para todas las condiciones posibles del arroyo a 300 mbar. Esta alternativa se prevé podría tener buen desempeño ya que se tiene una presión superior a las ensayadas (con las que se obtuvieron buenos resultados). A su vez representa un ahorro económico importante dado que no es necesario invertir en un sistema de control y no es necesario el variador de velocidad del compresor.

Bibliografía

[UTE, a] Portal ute | la energía que nos une.

[DES,] Rise (a s series) | desmi - proven technology.

[Appelsa, 2023] Appelsa (2023). Barras huecas | appelsa | uruguay.

[Brooker and Ireland, 1965] Brooker, E. W. and Ireland, H. O. (1965). Earth pressures at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal*, 2:1–15.

[Carvill, 2014] Carvill, J. (2014). *Mechanical Engineer's Data Handbook*. Butterworth-Heinemann.

[Chuquimarca Jiménez et al., 2022] Chuquimarca Jiménez, L. E., Cruz, J. C., Delgado Vergara, G., and Solano, E. J. (2022). Diseño y simulación de un sistema de cintas transportadoras para la clasificación de cajas. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 9:19–30.

[Dawson et al., 2006] Dawson, H. A., Reinhardt, U. G., and Savino, J. F. (2006). Use of electric or bubble barriers to limit the movement of eurasian ruffe (*gymnocephalus cernuus*). *Journal of Great Lakes Research*, 32(1):40–49.

[Eveleens et al., 2021] Eveleens, A. M., Ehrhorn, M. P. T., Studer, S., and Zoet, F. R. A. (2021). Watercourse provided with a bubble screen, and bubble screen therefore.

[Facultad de Ingeniería, 2021] Facultad de Ingeniería, U. d. l. R. (2021). *Instalaciones Eléctricas - Puesta a Tierra y Conductores de Protección*. PhD thesis.

[Flow, 2015] Flow, C. G. (2015).

[Gaddis and Vogelpohl, 1986] Gaddis, E. and Vogelpohl, A. (1986). Bubble formation in quiescent liquids under constant flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 41:97–105.

[Gnyloskurenko et al., 2003] Gnyloskurenko, S., Byakova, A., Raychenko, O., and Nakamura, T. (2003). Influence of wetting conditions on bubble formation at orifice in an inviscid liquid. transformation of bubble shape and size. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 218(1–3):73–87.

[Hastings and Popper, 2005] Hastings, M. and Popper, A. (2005). Effects of sound on fish. *Report to Jones and Stokes for California Department of Transportation*.

[Helinski et al., 2021] Helinski, O. K., Poor, C. J., and Wolfand, J. M. (2021). Ridding our rivers of plastic: A framework for plastic pollution capture device selection. *Marine Pollution Bulletin*, 165:112095.

- [ImageJ Fiji, 2011] ImageJ Fiji (2011). <https://imagej.net/software/fiji/downloads>.
- [Jaurena et al., 2018a] Jaurena, M., Rodríguez, R., and Olivera, A. (2018a). Informe de modelación hidrológica e hidráulica - proyecto ribera del miguelete.
- [Jaurena et al., 2018b] Jaurena, M., Rodríguez, R., and Olivera, A. (2018b). Informe de modelación hidrológica e hidráulica proyecto ribera del miguelete.
- [Jaurena et al., 2018c] Jaurena, M., Rodríguez, R., and Olivera, A. (2018c). Informe diagnóstico - proyecto ribera del miguelete.
- [Kobus, 1985] Kobus, H. (1985). *Introduction to air-water flows*.
- [Kobus, 1968] Kobus, H. E. (1968). Analysis of the flow induced by air-bubble systems. *Coastal Engineering Proceedings*, 1:65.
- [Kulkarni and Joshi, 2005] Kulkarni, A. A. and Joshi, J. B. (2005). Bubble formation and bubble rise velocity in gas-liquid systems: a review. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 44:5873–5931.
- [Law, 2017] Law, K. L. (2017). Plastics in the marine environment. *Annual Review of Marine Science*, 9:205–229.
- [Limongi, 2022] Limongi, P. (2022). Diagnóstico de estado de situación a nivel nacional sobre la contaminación marina por microplásticos.
- [Lo, 1991] Lo, J.-M. (1991). Air bubble barrier effect on neutrally buoyant objects. *Journal of Hydraulic Research*, 29:437–455.
- [Mascha and Christensen, 1983] Mascha, H. and Christensen, B. A. (1983). *Design of Low Pressure Air Curtains for Environmental Protection of Surface Waters*.
- [Mendoza, 2008] Mendoza, I. G. E. B. (2008). *Control de tamaño de burbujas en sistemas de flotación utilizando dispersores de gas tipo jet de orificio de descarga de abertura variable*.
- [Miyagi, 1929] Miyagi, O. (1929). Measurement of stream velocity by air bubbles. *Journal of the Society of Mechanical Engineers*, 32:305–313.
- [Naidoo et al., 2020] Naidoo, T., Rajkaran, A., et al. (2020). Impacts of plastic debris on biota and implications for human health: A south african perspective. *South African Journal of Science*, 116(5-6):1–8.
- [Open source physics, 2005] Open source physics (2005). <https://physlets.org/tracker/>.
- [Patrick et al., 1985] Patrick, P. H., Christie, A., Sager, D., Hocutt, C., and Stauffer, J. (1985). Responses of fish to a strobe light/ air-bubble barrier. *Fisheries Research*, 3:157–172.
- [Pereira, 2018] Pereira, G. B. (2018). Residuos sólidos en la trama hídrica urbana. tesis para la obtención del grado de magister en ingeniería ambiental, facultad de ingeniería, udelar.
- [Photron, ncom] Photron (<https://photron.com/>). Fastcam mini ux100.
- [Prata et al., 2020] Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., and Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the total environment*, 702:134455.

- [Ramakrishnan et al., 1969] Ramakrishnan, S., Kumar, R., and Kuloor, N. (1969). Studies in bubble formation—i bubble formation under constant flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 24:731–747.
- [Rhodes, 2018] Rhodes, C. J. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science Progress*, 101(3):207–260. PMID: 30025551.
- [Ritchie and Roser, 2018] Ritchie, H. and Roser, M. (2018). Plastic pollution. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
- [Rochman C. M. Browne M. A. Underwood A. J. van Franeker J. A. Thompson R. C. & Amaral-Zettler, 2016] Rochman C. M. Browne M. A. Underwood A. J. van Franeker J. A. Thompson R. C. & Amaral-Zettler, L. A. . (2016). The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. *Ecology*, 97(2):302–312.
- [Scholik and Yan, 2001] Scholik, A. and Yan, H. (2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hearing research*, 152:17–24.
- [Sika, 2014] Sika (2014). Sika anchorfix, adhesivo de curado rápido para anclajes químicos.
- [SonTek, 2019] SonTek (2019). Caudalímetro | sontek | unión europea.
- [Teamconcept, 2021] Teamconcept (2021). Sistemas de flotación por aire disuelto daf para el tratamiento de aguas residuales.
- [The great bubble barrier, 2016] The great bubble barrier (2016). <https://thegreatbubblebarrier.com/>.
- [Tomiyaama, 2002] Tomiyama, A. (2002). Single bubbles in stagnant liquids and in linear shear flows.
- [Tubing, 2003] Tubing, B. (2003). Prevention of ice formation to prevent frazil with bubble tubing®.
- [UDELAR, 2016] UDELAR, F. (2016). Tabla perfiles comerciales cmm fing udelar.
- [UTE, b] UTE. Reglamento de baja tensión instalaciones interiores o receptoras capítulo ii.
- [Zhang et al., 2022] Zhang, E., Stocchino, A., De Leo, A., and Fang, J. K.-H. (2022). Performance assessment of bubbles barriers for microplastic remediation. *Science of The Total Environment*, 844:157027.
- [Zielinski et al., 2011] Zielinski, D., Voller, V., and Hondzo, M. (2011). *Bubble Barrier Technologies for Common Carp*. PhD thesis.