



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SIFÓN DE CAPTACIÓN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA OPENFOAM.**

**Pablo Antonio Abarca Reyes**

Noviembre 2017

## **ANÁLISIS HIDRODINÁMICO Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SIFÓN DE CAPTACIÓN POR MEDIO DE LA HERRAMIENTA OPENFOAM.**

Pablo Antonio Abarca Reyes

### **COMISIÓN REVISORA**

### **NOTA**

### **FIRMA**

Patricio Winckler Grez  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

José Beyá Marshall  
Revisor 1

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Marco Matamala Castro  
Revisor 2

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DECLARACIÓN**

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

PABLO ABARCA REYES  
Alumno Memorista

---

PATRICIO WINCKLER GREZ  
Profesor Guía

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi polola Stephanie y su familia, por el amor y por las palabras de aliento cuando los caminos se ponen difíciles. A mis padres que, gracias a sus enseñanzas y valores entregados me han permitido lograr mis sueños con mucho esfuerzo y sacrificio. A mis abuelas, la Oli que me cuida desde el cielo, donde ella no más sabe la falta que me hace, y mi abuelita Mercedes, que siempre ha estado pendiente de mí. A mis hermanos del alma: Diego, Martín y Francisca que han sido un apoyo en este largo camino, sus muestras de cariño ha sido mi gran fuerza. Así también, agradezco a mis tías y tíos, primos y familia por sus palabras de aliento y por el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida.

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Hidráulica por darme la oportunidad de realizar mi práctica profesional durante 5 meses, al departamento de Ingeniería y específicamente a Don Luis Zamorano, Jaime Cotroneo, Ignacio Beyá, Rodrigo Herrera y Juan Enrique Galecio por el apoyo en el aprendizaje en OpenFOAM. A Don Max Borchert por sus sabias palabras, sus consejos profesionales me ayudaron mucho. A mi encargado de práctica Don Juan Carlos Vergara quiero agradecer por sus charlas día a día, el cual fue más allá de su función y se portó un 7 en mi adaptación. A mi partner del ping pong Xavier Abadie, por sus gran disposición a ayudar en todo, buenas conversas fumándonos su cigarrito. La institución completa me acogió como un miembro más, haciéndome participe en los asaditos para el 18 y en los partidos de con el fin de facilitar mi aprendizaje en la modelación física y numérica.

A mi profesor guía Dr. Patricio Winckler, que con su prolijidad y paciencia fue primordial para completar esta misión. Me enseñó que un modelador es más que saber meter los deditos al computador, la teoría es lo primordial para entender el sistema completo. A Raúl Oberreuter, que siempre preocupado me brindaba apoyo en todo, a veces retándome para que me apurara en terminar mi memoria. Agradezco también al Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile, que apoyó desinteresadamente en este estudio, facilitando el uso de su servidor Leftraru.

Quisiera destacar el apoyo de los profesores de la UV, donde cada uno aportó un granito de arena en mi formación. A mis compañeros y amigos de Universidad que sufrimos en muchas oportunidades en los ramos, en paros, tomas, cambios de sedes, etc. A mis amigos Felipe y Fernanda, que con su amistad y apoyo han sido un apoyo en mi vida. Quisiera agradecer también a las tías del aseo del campus, que todas las mañanas brindaban una sonrisa y unas palabras bonitas. Agradezco a los amigos incondicionales del kiosquito (Erwin, Sole y Clari) que fueron un pilar importantísimo durante mi paso por la Universidad, ya sea por la ayuda económica (peguitas part-time), o por sus largas conversas de la vida, las cuales dejaron muchas enseñanzas.

Cada vivencia que tuve en este periodo universitario, ya sea malo o bueno, dejó un aprendizaje. Lo importante es recordar con humildad y sabiduría dichos momentos, porque a partir de eso se crece como ser humano.

Pablo Abarca Reyes.

*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa” - Mahatma Gandhi.*

## **CONTENIDO**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>16</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GENERAL.....   | 16        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 16        |
| <b>3</b> | <b>ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>4</b> | <b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....   | <b>19</b> |
| 4.1      | SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA.....  | 20        |
| 4.1.1    | METODOLOGÍAS DE CAPTACIÓN.....  | 20        |
| 4.1.2    | SIFÓN DE CAPTACIÓN.....   | 24        |
| 4.1.3    | CATASTRO DE PROYECTOS CON SISTEMAS DE CAPTACIONES MARÍTIMAS EN CHILE. 25          |           |
| 4.2      | ANTECEDENTES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS.....                                       | 28        |
| 4.2.1    | ECUACIONES DE GOBIERNO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS.....                             | 28        |
| 4.2.2    | FENÓMENOS TURBULENTOS.....  | 29        |
| 4.2.3    | ECUACIONES PROMEDIADAS DE REYNOLDS (RANS).....                                    | 31        |
| 4.2.4    | HIPÓTESIS DE LA VISCOCIDAD TURBULENTO.....  | 34        |
| 4.2.5    | PRINCIPIO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO.....                                     | 35        |
| 4.2.6    | APROXIMACIONES PARA EL CIERRE DE LA TURBULENCIA.....                              | 37        |
| 4.3      | FLUJO PERMANENTE Y VARIADO EN CONDUCTOS CERRADOS.....                             | 38        |
| 4.3.1    | ECUACIONES UNIDIMENSIONALES PARA FLUJOS PERMANENTES (PRINCIPIO DE BERNOULLI)..... | 39        |
| 4.3.2    | PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN CODO DE ADUCCIÓN.....                                      | 40        |
| 4.3.3    | PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN ENTRADA DE UN CONDUCTO CERRADO.....                        | 41        |
| 4.3.4    | PÉRDIDAS FRICCIONALES AL INTERIOR DE UN CONDUCTO CERRADO.....                     | 42        |
| 4.4      | SOFTWARE OPENFOAM – SOLUCIONADOR INTERFOAM.....                                   | 43        |
| 4.4.1    | DEFINICIÓN DE PARÁMETRO DE FRACCIÓN DE FASE (VOF).....                            | 44        |
| 4.4.2    | ECUACIONES DE GOBIERNO PARA FLUJO BIFÁSICO.....                                   | 45        |
| 4.4.3    | MODELO DE CIERRE DE TURBULENCIA $k - \epsilon$ ESTÁNDAR.....                      | 47        |
| 4.4.4    | CAPA LÍMITE.....  | 48        |
| <b>5</b> | <b>METODOLOGÍA</b> .....  | <b>53</b> |
| 5.1      | PRE-PROCESO.....  | 54        |
| 5.1.1    | GEOMETRÍA BASE DEL MODELO.....  | 56        |
| 5.1.2    | GENERACIÓN DE MALLA.....  | 59        |
| 5.1.3    | BLOCKMESH.....  | 59        |
| 5.1.4    | CÁLCULO DE CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.....                                  | 64        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 5.2       | PROCESO.....  | 74         |
| <b>6</b>  | <b>RESULTADOS.....</b>  | <b>75</b>  |
| 6.1       | MODELO DE SIFÓN DE CAPTACIÓN EN SU SITUACIÓN BASE.....                        | 75         |
| 6.1.1     | CONSERVACIÓN DE ECUACIONES DE GOBIERNO.....                                   | 75         |
| 6.1.2     | ANÁLISIS DE $y +$ .....   | 77         |
| 6.1.3     | CONSERVACIÓN DE MASA ENTRE PARCHES DE ENTRADA Y SALIDA.....                   | 78         |
| 6.1.4     | ANÁLISIS HIDRODINÁMICO TEMPORAL EN EL SIFÓN DE CAPTACIÓN.....                 | 79         |
| 6.1.5     | ANÁLISIS HIDRODINÁMICO ESPACIAL EN EL SIFÓN DE CAPTACIÓN.....                 | 85         |
| 6.1.6     | CONCLUSIONES.....   | 103        |
| 6.2       | MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CAMPANA DE SUCCIÓN.....                            | 104        |
| 6.2.1     | VELOCIDADES EN CAMPANA SUCCIÓN.....   | 104        |
| 6.2.2     | FENÓMENOS TURBULENTOS EN CAMPANA DE SUCCIÓN.....                              | 106        |
| 6.2.3     | CONCLUSIONES DE OPTIMIZACIÓN.....   | 108        |
| 6.3       | MODELO DE OPTIMIZACIÓN FINAL DE SIFÓN DE CAPTACIÓN.....                       | 109        |
| 6.3.1     | CONSERVACIÓN DE ECUACIONES DE GOBIERNO.....                                   | 109        |
| 6.3.2     | ANÁLISIS DE $y +$ .....   | 111        |
| 6.3.3     | CONSERVACIÓN DE MASA ENTRE PARCHES DE ENTRADA Y SALIDA.....                   | 112        |
| 6.3.4     | ANÁLISIS HIDRODINÁMICO TEMPORAL EN EL SIFÓN DE CAPTACIÓN.....                 | 113        |
| 6.3.5     | ANÁLISIS HIDRODINÁMICO ESPACIAL EN EL SIFÓN DE CAPTACIÓN.....                 | 117        |
| 6.4       | COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....  | 133        |
| <b>7</b>  | <b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>                                   | <b>135</b> |
| 7.1       | CONCLUSIONES.....   | 135        |
| 7.2       | TRABAJOS FUTUROS.....   | 136        |
| <b>8</b>  | <b>TERMINOLOGÍA.....</b>  | <b>137</b> |
| <b>9</b>  | <b>GLOSARIO.....</b>  | <b>139</b> |
| <b>10</b> | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>140</b> |
| <b>11</b> | <b>ANEXOS.....</b>  | <b>145</b> |
| 11.1      | ANEXO I: PROGRAMACIONES DE LIBRERÍAS INTERNAS - OF4.0.....                    | 145        |
| 11.2      | ANEXO II: METODOLOGÍA.....  | 148        |
| 11.3      | ANEXO III: RESULTADOS - MODELO SITUACIÓN BASE.....                            | 149        |
| 11.4      | ANEXO IV: RESULTADOS - OPTIMIZACIÓN DE CAMPANA DE SUCCIÓN.....                | 155        |
| 11.5      | ANEXO V: RESULTADOS - MODELO DE OPTIMIZACIÓN FINAL DE SIFÓN DE CAPTACIÓN..... | 157        |
| <b>12</b> | <b>APÉNDICE.....</b>  | <b>167</b> |
| 12.1      | APÉNDICE A: NOTACIÓN VECTORIAL Y NOTACIÓN INDICIAL DE EINSTEIN.....           | 167        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 12.2   | APÉNDICE B: SOLUCIONADOR INTERFOAM – OPENFOAM 4.0.....   | 170 |
| 12.2.1 | DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO - VOLÚMENES FINITOS.....  | 170 |
| 12.2.2 | DISCRETIZACION ESPACIAL DEL DOMINIO.....   | 170 |
| 12.2.3 | DISCRETIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE GOBIERNO.....  | 172 |
| 12.2.4 | DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.....   | 174 |
| 12.2.5 | CONDICIONES DE BORDE.....  | 175 |
| 12.2.6 | CONTROL DE ESTABILIDAD NUMÉRICA (N° DE COURANT).....   | 177 |
| 12.2.7 | RESOLUCIÓN DEL SISTEMA RANS.....   | 178 |
| 12.2.8 | RUTA DE DIRECTORIOS DE MODELOS OPENFOAM.....   | 182 |
| 12.3   | APÉNDICE C: CÁLCULO DE ENERGÍA CINÉTICA DEL FLUJO MEDIO.....   | 184 |
| 12.4   | APÉNDICE D: DERIVACIÓN DE ECUACIÓN DE BALANCE DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO DEL FLUJO MEDIO DE REYNOLDS..... | 186 |
| 12.5   | APÉNDICE E: COEFICIENTES DE ESFUERZOS TANGENCIALES DE FANNING.....                                       | 188 |
| 12.5.1 | MODELO DE SITUACIÓN BASE.....  | 188 |
| 12.5.2 | MODELO DE OPTIMIZACIÓN FINAL (FILTRO DE ADUCCIÓN).....   | 190 |

## **INDICE DE ILUSTRACIONES**

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: Central Termoeléctrica Andina - Mejillones, Región de Antofagasta.....                        | 17 |
| Ilustración 2: Campana de succión y Codo 90° – Central Termoeléctrica 375MW Bruto, Bahía de Mejillones. .... | 17 |
| Ilustración 3: Pozo vertical. ....   | 20 |
| Ilustración 4: Galería de infiltración.....  | 20 |
| Ilustración 5: Toma directa en línea de Costa por sistema de bombas. ....                                    | 20 |
| Ilustración 6: Sistema de captación con sifón invertido sumergido - Proyecto Dominga. ..                     | 21 |
| Ilustración 7: Sifón normal con sistema de captación fuera de la línea de costa. ....                        | 21 |
| Ilustración 8: Secciones de sifón normal con sistema de captación fuera de la línea de costa. ....           | 22 |
| Ilustración 9: Filtro de aducción. ....  | 22 |
| Ilustración 10: Sifón Normal .....   | 24 |
| Ilustración 11: Sifón Invertido .....  | 24 |
| Ilustración 12: Descomposición de la turbulencia según el Teorema de Reynolds.....                           | 31 |
| Ilustración 13: Flujo bidimensional en un codo de 90°. ....  | 40 |
| Ilustración 14: Variación de pérdida de carga, en función del radio relativo en codos de tuberías lisas..... | 41 |
| Ilustración 15: Flujo en región de entrada en conducto cerrado. ....   | 41 |
| Ilustración 16: Capa límite - HRN (Izquierda) vs LRN (Derecha).....  | 50 |
| Ilustración 17: Diagrama de flujo para la obtención del modelo optimizado.....                               | 53 |
| Ilustración 18: Pérdida de carga, en función del radio relativo para sifón de captación.....                 | 55 |
| Ilustración 19: Modelo situación base de Sifón de Captación – Escala 1:340. ....                             | 56 |
| Ilustración 20: Fronteras de la geometría del mallado base del modelo - Software Blender. ....               | 57 |
| Ilustración 21: Parches de condiciones de borde del dominio del modelo en su situación base. ....            | 58 |
| Ilustración 22: Esquema de hexaedro generado por blockMesh. ....   | 59 |
| Ilustración 23: Bloque de corte generado por blockMesh para esculpimiento de snappyhexMesh. ....             | 60 |
| Ilustración 24: Mallado post-esculpimiento por snappyhexMesh.....  | 61 |
| Ilustración 25: Malla final extruida - extrudeMesh .....   | 62 |
| Ilustración 26: Informe de control de calidad del mallado base - checkMesh. ....                             | 63 |
| Ilustración 27: Esquema para el cálculo de presiones en un sifón de captación. ....                          | 64 |
| Ilustración 28: Distribución de Presiones en situación estática según nomenclatura OF4.0. ....               | 66 |
| Ilustración 29: Errores asociados a la resolución de la ecuación de continuidad – Modelo situación base..... | 75 |
| Ilustración 30: Residuales solver InterFOAM – Modelo situación base.....                                     | 76 |



|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 31: Valores $Y +$ para paredes internas del sifón de captación – Modelo situación base. ....          | 77  |
| Ilustración 32: Caudales en parches de entrada y salida – Modelo situación base .....                             | 78  |
| Ilustración 33: Nodos de control en el Parche de Salida. ....   | 79  |
| Ilustración 34: Nodos de control en línea de aducción horizontal ( $X= 18$ [m]).....                              | 80  |
| Ilustración 35: Nodos de control en corte de $45^\circ$ en codo de aducción.....                                  | 80  |
| Ilustración 36: Nodos de control en sector campana de Succión ( $Z= -4$ [m]). ....                                | 81  |
| Ilustración 37: Magnitudes de velocidades en Nodos de Control – Modelo situación base. ....                       | 82  |
| Ilustración 38: Presiones modificadas en Nodos de Control – Modelo situación base. ....                           | 83  |
| Ilustración 39: Presiones modificadas y Velocidades en Nodos de Control – Modelo situación base.....              | 84  |
| Ilustración 40: Campo de presiones modificadas – Modelo situación base. ....                                      | 85  |
| Ilustración 41: Campo de magnitudes de velocidades – Modelo situación base. ....                                  | 86  |
| Ilustración 42: Perfiles de las magnitudes de velocidades – Modelo situación base. ....                           | 87  |
| Ilustración 43: Presiones medias en sección al interior del sifón – Modelo situación base. ....                   | 88  |
| Ilustración 44: Velocidad media en sección al interior del sifón – Modelo situación base. ....                    | 89  |
| Ilustración 45: Energía cinética media en sección al interior del sifón – Modelo situación base. ....             | 90  |
| Ilustración 46: Energía cinética turbulenta media en sección al interior del sifón - Modelo situación base.....   | 91  |
| Ilustración 47: Tasa de disipación turbulenta media en sección al interior del sifón - Modelo situación base..... | 92  |
| Ilustración 48: Viscosidad turbulenta media en sección al interior del sifón - Modelo situación base. ....        | 92  |
| Ilustración 49: Componente turbulenta de la velocidad media en secciones - Modelo situación base.....             | 93  |
| Ilustración 50: Pérdidas de energías totales por sección a lo largo del sifón – Modelo situación base.....        | 94  |
| Ilustración 51: Magnitud de esfuerzos de corte en paredes internas del sifón – Modelo situación base.....         | 95  |
| Ilustración 52: Coeficiente de esfuerzo tangencial en paredes internas del sifón - Modelo situación base.....     | 96  |
| Ilustración 53: Pérdidas de energías por fricción – Modelo situación base.....                                    | 97  |
| Ilustración 54: Curvas de presiones a lo largo de ejes de muestreo – Modelo situación base. ....                  | 98  |
| Ilustración 55: Líneas de corriente del flujo en codo de aducción de $90^\circ$ – Modelo situación base. ....     | 99  |
| Ilustración 56: Perfiles de magnitudes de velocidades en campana de succión – Modelo situación base.....          | 100 |
| Ilustración 57: Pérdidas de energía en campana de succión – Modelo situación base... ..                           | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 58: Líneas de corriente en campana de succión – Modelo situación base.....                                 | 101 |
| Ilustración 59: Campo direccional de vectores de velocidad en campana de succión – Modelo situación base.....          | 102 |
| Ilustración 60: Energía cinética media en secciones de muestreo en zona de captación. ....                             | 105 |
| Ilustración 61: Pérdidas de carga totales en campanas modeladas.....   | 106 |
| Ilustración 62: Errores asociados a la resolución de la ecuación de continuidad – Modelo de optimización final. ....   | 109 |
| Ilustración 63: Residuales solver InterFOAM – Modelo de optimización final. ....                                       | 110 |
| Ilustración 64: Valores $Y +$ para paredes internas del sifón de captación – Modelo de optimización final. ....        | 111 |
| Ilustración 65: Caudales en parches de entrada y salida – Modelo de optimización final. ....                           | 112 |
| Ilustración 66: Nodos de Control en sector Campana de Succión ( $Z= -4$ [m]) – Modelo Optimizado Final.....            | 113 |
| Ilustración 67: Magnitudes de velocidades en Nodos de Control – Modelo de optimización final. ....                     | 114 |
| Ilustración 68: Presiones modificadas en Nodos de Control – Modelo de optimización final. ....                         | 115 |
| Ilustración 69: Presiones modificadas y Velocidades en Nodos de Control – Modelo situación base.....                   | 116 |
| Ilustración 70: Campo de presiones modificadas – Modelo de optimización final.....                                     | 117 |
| Ilustración 71: Campo de magnitudes de velocidades – Modelo de optimización final....                                  | 118 |
| Ilustración 72: Perfiles de las magnitudes de velocidades – Modelo de optimización final. ....                         | 119 |
| Ilustración 73: Presiones medias en sección al interior del sifón – Modelo de optimización final. ....                 | 120 |
| Ilustración 74: Velocidad media en sección al interior del sifón – Modelo de optimización final. ....                  | 121 |
| Ilustración 75: Energía cinética media en sección al interior del sifón – Modelo de optimización final. ....           | 122 |
| Ilustración 76: Energía cinética turbulenta media en sección interior del sifón - Modelo de optimización final. ....   | 122 |
| Ilustración 77: Tasa de disipación turbulenta media en sección interior del sifón - Modelo de optimización final. .... | 123 |
| Ilustración 78: Viscosidad turbulenta media en sección interior del sifón - Modelo de optimización final. ....         | 124 |
| Ilustración 79: Componente turbulenta de la velocidad media en secciones - Modelo de optimización final. ....          | 124 |
| Ilustración 80: Pérdidas de energías totales por sección a lo largo del sifón - Modelo de optimización final. ....     | 125 |
| Ilustración 81: Magnitud de esfuerzos de corte en paredes internas del sifón - Modelo de optimización final. ....      | 126 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 82: Coeficientes de esfuerzos tangenciales locales en paredes internas del sifón - Modelo de optimización final..... | 126 |
| Ilustración 83: Pérdidas de energías por fricción – Modelo de optimización final. ....   | 127 |
| Ilustración 84: Curvas de presiones a lo largo de ejes de muestreo – Modelo de optimización final. ....                          | 128 |
| Ilustración 85: Líneas de corriente del flujo en codo de aducción de 90° – Modelo de optimización final. ....                    | 129 |
| Ilustración 86: Perfiles de velocidades en sifón de captación – Modelo de optimización final. ....                               | 130 |
| Ilustración 87: Pérdidas de energía total en campana de succión – Modelo de optimización final .....                             | 131 |
| Ilustración 88: Trayectorias de partículas en campana de succión – Modelo de optimización final. ....                            | 132 |
| Ilustración 89: Campo direccional de vectores de velocidad en campana de succión – Modelo de optimización final.....             | 132 |
| Ilustración 90: Pérdidas de energías totales del flujo medio en zona de captación - Modelos de simulación.....                   | 133 |
| Ilustración 91: Magnitud de velocidad media integrada en zona de captación - Modelos de simulación.....                          | 134 |
| Ilustración 92: Programación de la generación del mallado base - blockMesh.....  | 145 |
| Ilustración 93: Programación de esculpimiento de mallado – snappyhexMesh. ....   | 146 |
| Ilustración 94: Programación del proceso de extrusión del plano de simetría - extrudeMesh .....                                  | 147 |
| Ilustración 95: Vista 2D Paraview - Malla base de cálculo creada por blockMesh.....  | 148 |
| Ilustración 96: Vista 3D - Malla base de cálculo creada por blockMesh.....   | 148 |
| Ilustración 97: Campo de presiones - Modelo situación base.....  | 149 |
| Ilustración 98: Trayectorias en líneas de corriente – Modelo situación base. ....  | 149 |
| Ilustración 99: Perfiles de velocidad al interior del sifón de captación - Modelo Situación Base.....                            | 150 |
| Ilustración 100: Secciones transversales de muestreo al interior del sifón de captación - Modelo Situación Base.....             | 151 |
| Ilustración 101: Secciones transversales integradas para cálculo de pérdidas de energías – Modelo situación base.....            | 152 |
| Ilustración 102: Esfuerzos de corte pared superior - Modelo situación base. ....   | 153 |
| Ilustración 103: Esfuerzos de corte pared inferior - Modelo situación base. ....   | 153 |
| Ilustración 104: Ejes de presiones dinámicas al interior del sifón – Modelo en su situación base. ....                           | 154 |
| Ilustración 105: Secciones de muestreo para cálculo de pérdidas de energía en campana de succión.....                            | 154 |
| Ilustración 106: Campana de succión de modelo de optimización N°1. ....  | 155 |
| Ilustración 107: Campana de succión de modelo de optimización N°2. ....  | 155 |
| Ilustración 108: Esquema de Modelo de optimización N°1 de sifón de captación. ....   | 156 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 109: Esquema de Modelo de optimización N°2 de sifón de captación. ....  | 156 |
| Ilustración 110: Geometría de modelo sifón de captación optimizado con filtro de aducción. ....                               | 157 |
| Ilustración 111: Campana de succión con filtro de aducción – Modelo de optimización final. ....                               | 158 |
| Ilustración 112: Esquema de Modelo de optimización final de sifón de captación con filtro de aducción. ....                   | 158 |
| Ilustración 113: Campo de presiones - Modelo de optimización final. ....  | 159 |
| Ilustración 114: Trayectorias en líneas de corriente – Modelo de optimización final. ....                                     | 159 |
| Ilustración 115: Perfiles de velocidad al interior del sifón de captación - Modelo de optimización final. ....                | 160 |
| Ilustración 116: Secciones transversales de muestreo al interior del sifón de captación – Modelo de optimización final. ....  | 161 |
| Ilustración 117: Secciones transversales integradas para cálculo de pérdidas de energías – Modelo de optimización final. .... | 162 |
| Ilustración 118: Esfuerzos de corte pared superior - Modelo de optimización final. ....                                       | 163 |
| Ilustración 119: Esfuerzos de corte pared inferior - Modelo de optimización final. ....                                       | 163 |
| Ilustración 120: Ejes de presiones dinámicas al interior del sifón – Modelo de optimización final. ....                       | 164 |
| Ilustración 121: Secciones de muestreo para cálculo de pérdidas de energía en campana – Modelo de optimización final. ....    | 164 |
| Ilustración 122: Campo escalar de energía cinética turbulenta en campana de succión – Modelo de optimización final. ....      | 165 |
| Ilustración 123: Campo escalar de tasa de disipación turbulenta en campana de succión – Modelo de optimización final. ....    | 165 |
| Ilustración 124: Campo escalar de viscosidad turbulenta en campana de succión – Modelo de optimización final. ....            | 166 |
| Ilustración 125: Discretización del dominio. ....   | 170 |
| Ilustración 126: Celdas contiguas conectadas por cara común. ....   | 171 |
| Ilustración 127: Esquema de directorios de un modelo en OF4.0 ....  | 182 |
| Ilustración 128: Comparación de cálculo de energía cinética media e integrada – Modelo situación base. ....                   | 184 |
| Ilustración 129: Comparación de cálculo de energía cinética media e integrada – Modelo de optimización final. ....            | 185 |
| Ilustración 130: Reynolds locales en secciones integradas – Modelo situación base. ....                                       | 188 |
| Ilustración 131: Reynolds locales en secciones integradas – Modelo de optimización final. ....                                | 190 |

## **INDICE DE TABLAS**

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.1: Tabla comparativa de tipologías de captación de agua de mar según sus atributos. ....               | 23  |
| Tabla 4.2: Proyectos de captaciones de agua de mar en Chile para uso no industrial.....                        | 25  |
| Tabla 4.3: Proyectos de captaciones de agua de mar en Chile para uso industrial, minero e hidroeléctrico. .... | 26  |
| Tabla 5.1: Clasificación de parches .....  | 60  |
| Tabla 5.2: Condiciones de borde del modelo .....   | 73  |
| Tabla 6.1: Optimización de campana de succión - Campos de velocidades.....                                     | 104 |
| Tabla 6.2: Optimización de campana de succión - Campos de líneas de corriente.....                             | 104 |
| Tabla 6.3: Optimización de campana de succión - Campos de energía cinética turbulenta. ....                    | 106 |
| Tabla 6.4: Optimización de campana de succión - Campos de tasa de disipación turbulenta. ....                  | 107 |
| Tabla 6.5: Optimización de campana de succión - Campos de viscosidad turbulenta. ...                           | 107 |
| Tabla 12.1: Coeficientes de esfuerzos tangenciales según literatura – Modelo situación base. ....              | 189 |
| Tabla 12.2: Coeficientes de esfuerzos tangenciales según literatura – Modelo de optimización final. ....       | 191 |

## **RESUMEN**

A lo largo de nuestro país existe una problemática importante en materia hídrica y energética. Esta problemática radica en el aumento de la desertificación en zonas rurales y urbanas, especialmente en la zona centro norte de nuestro país (Ministerio del Interior - Gobierno de Chile, 2014). Con este nuevo escenario, la industria minera emplazada en la zona norte del país ha sido fuertemente afectada, por lo que ha surgido la necesidad de aumentar las inversiones en nuevas técnicas de abastecimiento de agua y de energía eléctrica. Para combatir esta carencia, es que inversionistas mineros han puesto sus proyectos en forma integrada junto a plantas desaladoras y termoeléctricas (CEPAL, 2009). Este tipo de plantas utilizan sistemas de abastecimiento de agua de mar por medio de sifones de captación, que intervienen el medio marino con un impacto ambiental que puede ser negativo para la flora y fauna. Con el objeto de minimizar el impacto ambiental que provocan los sistemas de impulsión al medio ambiente marino, y generar ideas de diseños de estructuras hidrodinámicamente eficientes para estos sistemas de producción, es que se generó este estudio. Éste consistió en la simulación de una tipología tipo sifón de captación, bajo una modelación 2D, por medio de aproximaciones numéricas de las ecuaciones RANS en el programa OpenFOAM. Esta modelación se desarrolló con el fin de reducir los fenómenos turbulentos en la captación, y en consecuencia minimizar las pérdidas de energía del flujo medio.

A partir de un proceso iterativo de simulaciones, se obtuvo una optimización de la campana de succión en base al comportamiento de las líneas de corriente del flujo, obteniendo un diseño de una campana con un difusor curvo acoplado a un filtro de aducción. Esta optimización permitió reducir la pérdida de energía de flujo medio por efectos turbulentos, desde  $0.0142 [m]$  a  $0.0043 [m]$  entre el modelo base y optimizado respectivamente, lo que representa una disminución en un 70% aproximadamente. En consecuencia, la velocidad media integrada del flujo medio aumentó desde  $0.6 [m/s]$  a  $0.74 [m/s]$  en la salida del sifón. Por medio del modelo de optimización se obtuvo una idea de diseño de una campana de succión más eficiente, y que además cumple los requerimientos medioambientales, donde las velocidades de arrastre en la captación son inferiores a  $0.15 [m/s]$  (EPA , 2000).